



HAL
open science

**Mesure de l'attention visuelle au football :
contextualisation des contraintes d'évaluation en réalité
virtuelle**

Alexandre Vu

► **To cite this version:**

Alexandre Vu. Mesure de l'attention visuelle au football: contextualisation des contraintes d'évaluation en réalité virtuelle. Education. Université Rennes 2, 2023. Français. NNT: 2023REN20017. tel-04197091

HAL Id: tel-04197091

<https://theses.hal.science/tel-04197091v1>

Submitted on 5 Sep 2023

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

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

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITÉ DE RENNES 2

ÉCOLE DOCTORALE N° 646
*Éducation, Langues, Interactions, Cognition,
Clinique, Expertise*
Spécialité : *STAPS*

Par

Alexandre VU

Mesure de l'attention visuelle au football : contextualisation des contraintes d'évaluation en réalité virtuelle

Thèse présentée et soutenue à l'Université Rennes 2, le 17 avril 2023
Unité de recherche : Univ Rennes, Inria, M2S - EA 7470, Rennes, France

Rapporteurs avant soutenance :

Gilles MONTAGNE Professeur des Universités - Aix-Marseille Univ.
Elisabeth ROSNET Professeur des Universités - Univ. de Reims Champagne-Ardenne

Composition du Jury :

| | | |
|--------------------|------------------|---|
| Membres du jury : | Gilles MONTAGNE | Professeur des Universités, Aix-Marseille Univ. |
| | Elisabeth ROSNET | Professeur des Universités, Univ. de Reims Champagne-Ardenne |
| | Laure FERNANDEZ | Maître de Conférences, Aix-Marseille Univ. |
| | Thomas ROMEAS | Chef recherche et innovation, Institut national du sport du Québec et Professeur associé, Univ. de Montréal |
| | Chloé LEPRINCE | Responsable adjointe du Centre de Recherche, Fédération Française de Football |
| | Anthony SOREL | Co-encadrant, Ingénieur de Recherche, Univ. Rennes 2 |
| Dir. de thèse : | Richard KULPA | Professeur des Universités, Univ. Rennes 2 |
| Co-dir. de thèse : | Benoit BIDEAU | Professeur des Universités, Univ. Rennes 2 |

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITÉ DE RENNES 2

ÉCOLE DOCTORALE N° 646
*Éducation, Langues, Interactions, Cognition,
Clinique, Expertise*
Spécialité : *STAPS*

Par

Alexandre VU

Mesure de l'attention visuelle au football : contextualisation des contraintes d'évaluation en réalité virtuelle

Thèse présentée et soutenue à l'Université Rennes 2, le 17 avril 2023
Unité de recherche : Univ Rennes, Inria, M2S - EA 7470, Rennes, France

Rapporteurs avant soutenance :

Gilles MONTAGNE Professeur des Universités - Aix-Marseille Univ.
Elisabeth ROSNET Professeur des Universités - Univ. de Reims Champagne-Ardenne

Composition du Jury :

| | | |
|--------------------|------------------|---|
| Membres du jury : | Gilles MONTAGNE | Professeur des Universités, Aix-Marseille Univ. |
| | Elisabeth ROSNET | Professeur des Universités, Univ. de Reims Champagne-Ardenne |
| | Laure FERNANDEZ | Maître de Conférences, Aix-Marseille Univ. |
| | Thomas ROMEAS | Chef recherche et innovation, Institut national du sport du Québec et Professeur associé, Univ. de Montréal |
| | Chloé LEPRINCE | Responsable adjointe du Centre de Recherche, Fédération Française de Football |
| | Anthony SOREL | Co-encadrant, Ingénieur de Recherche, Univ. Rennes 2 |
| Dir. de thèse : | Richard KULPA | Professeur des Universités, Univ. Rennes 2 |
| Co-dir. de thèse : | Benoit BIDEAU | Professeur des Universités, Univ. Rennes 2 |

FINANCEMENT

Cette thèse est financée par un contrat doctoral ARED de la Région Bretagne.

Cette thèse a également été labellisée et soutenue par l'EUR DIGISPORT. Elle bénéficie ainsi d'un environnement de travail financé par l'ANR dans le cadre du programme "France 2030" (ANR-18-EURE-0022).

REMERCIEMENTS

Même si le travail de thèse peut paraître individuel, c'est bien l'aboutissement d'un travail d'équipe qui est rendu ici. Cette page ne suffira pas à exprimer toute la reconnaissance que j'ai envers celles et ceux qui m'ont accompagné, de près ou de loin, dans cette aventure. Évidemment, ma gratitude s'adresse à bien plus de personnes que celles mentionnées dans ces quelques lignes.

Pour commencer, je tiens à remercier chaleureusement tous les membres du jury qui ont pris la peine de se dégager du temps pour évaluer ce travail. Un grand merci à Elisabeth Rosnet et à Gilles Montagne qui m'ont fait l'honneur de rapporter ce travail de thèse. Un grand merci à Laure Fernandez, Chloé Leprince et Thomas Romeas pour leur expertise.

Quand je parle de travail d'équipe, je fais largement allusion à l'encadrement de mes 3 directeurs de thèse. Un très grand merci à Benoît, de m'avoir permis de réaliser cette thèse dans des conditions exceptionnelles de travail. Un très grand merci à Richard, pour son œil aiguisé sur les fautes d'orthographe, mais surtout pour son expertise et ses conseils avisés. Un très grand merci à Anthony, pour ses compétences et sa disponibilité. Surtout, merci pour votre amitié et votre bienveillance.

Un grand merci aux institutions qui m'ont accompagné dans mon parcours étudiant, à savoir l'Université Rennes 2, l'Université Rennes 1 et dans cette thèse, à savoir le laboratoire M2S, l'équipe MimeTIC de l'Inria, l'école doctorale ELICCE, l'EUR DIGISPORT et le département 2SEP de l'ENS Rennes.

Un grand merci à tous les membres du laboratoire M2S, pour votre aide dans le travail ou tout simplement pour votre bonne humeur et votre compagnie toujours agréable. Comme vous êtes très nombreux, je ne serai pas exhaustif dans ces remerciements et je sais que le comprendrez. Tout de même, un grand merci à Anne-Hélène de m'avoir initié au monde de la recherche.

En parlant de travail d'équipe, je fais également allusion aux collègues doctorants, ceux qui sont partis du labo et ceux qui sont toujours présents. Une nouvelle fois, je ne serai pas exhaustif dans les remerciements et j'espère que vous ne m'en voudrez pas. Sachez qu'il m'a toujours plu de venir travailler simplement pour passer du temps avec vous. Je souhaite à chacun de prendre autant de plaisir que j'ai pu en avoir durant cette thèse. Et surtout, je sais que votre amitié ne s'arrête pas aux portes du labo. Un très grand merci à vous. To my colleagues from another country, thank you very much !

Un grand merci aux participants et aux joueurs qui ont pris part à nos travaux. Un grand merci aux entraîneurs avec lesquels nous avons pu interagir et qui nous ont accueilli dans leur monde. Votre enseignement nous a été très riche.

Un grand merci à Adrien, Thomas et Thibaut pour leur aide sur la relecture du manuscrit.

Un grand merci (je sais qu'il va faire plaisir aux collègues doctorants celui-là), un immense merci même, à l'équipe du restaurant universitaire de Ker-Lann, qui aura eu la gentillesse de me nourrir pendant plusieurs années !

Plus sérieusement, un très grand merci à mes amis et à ma famille, à Mam et Alicia, qui font toujours passer le bonheur des autres avant le leur. À Pap, qu'il soit tranquille, car Mimi et Loulou vont très bien aujourd'hui. Enfin, à Charlotte, je tâcherai de te soutenir dans tous tes projets aussi bien que tu l'as fait pour moi.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| Introduction Générale | 21 |
| 1 État de l'art | 25 |
| 1.1 Prise d'information et attention visuelle au football | 25 |
| 1.1.1 Sources d'information en situation de jeu | 27 |
| 1.1.1.1 Utilisation des indices posturaux | 27 |
| 1.1.1.2 Perception des déplacements relatifs entre joueurs | 28 |
| 1.1.2 Activité du regard et attention visuelle au football | 30 |
| 1.1.2.1 Description des comportements d'exploration visuelle | 31 |
| 1.1.2.2 Les stratégies d'exploration visuelle | 31 |
| 1.1.2.3 Capture de l'attention visuelle | 34 |
| 1.2 Mesure de l'attention visuelle dynamique en laboratoire : la tâche de suivi visuel | 36 |
| 1.2.1 Le suivi visuel de multiples objets | 37 |
| 1.2.1.1 Influence des caractéristiques situationnelles | 38 |
| 1.2.1.2 Activité du regard pendant le suivi visuel | 39 |
| 1.2.2 Le suivi visuel en fonction de la pratique et de l'expertise sportive | 40 |
| 1.2.2.1 Effet de l'âge | 40 |
| 1.2.2.2 Effet de la pratique d'une activité exigeant de l'attention | 40 |
| 1.2.2.3 Effet de la pratique et de l'expertise sportive | 41 |
| 1.2.2.4 Autres facteurs individuels confondants | 42 |
| 1.2.2.5 Activité du regard en fonction de l'expertise | 42 |
| 1.2.3 Transfert de l'entraînement du suivi visuel | 43 |
| 1.2.3.1 Entraînabilité du suivi visuel | 43 |
| 1.2.3.2 Transfert vers d'autres tests perceptivo-cognitifs | 43 |
| 1.2.3.3 Transfert vers le terrain | 44 |
| 1.3 Évaluation contextualisée au football : application de la réalité virtuelle | 46 |

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1.3.1 | Contextualisation de l'évaluation en laboratoire | 46 |
| 1.3.1.1 | Compétence perceptivo-cognitive ciblée | 47 |
| 1.3.1.2 | Conditions de visualisation | 48 |
| 1.3.1.3 | Modalité de réponse | 50 |
| 1.3.1.4 | Contraintes multitâches | 51 |
| 1.3.2 | Réalité virtuelle et performance au football | 53 |
| 1.3.2.1 | Immersion et présence | 55 |
| 1.3.2.2 | Avantage de la RV sur la vidéo dans la performance sportive | 56 |
| 1.3.2.3 | Activité d'exploration visuelle en RV | 57 |
| 1.3.2.4 | Évaluation de l'expertise sportive en RV | 58 |
| 2 | Synthèse et objectifs | 61 |
| 3 | Méthodologie générale | 65 |
| 3.1 | Description de la tâche Multiple-Players-Tracking | 65 |
| 3.1.1 | Présentation de l'environnement virtuel | 65 |
| 3.1.2 | Déroulé de la tâche de suivi visuel | 66 |
| 3.2 | Déplacement des joueurs virtuels | 67 |
| 3.2.1 | Études 1 et 2 - Influence des trajectoires réelles | 67 |
| 3.2.1.1 | Sélection des situations réelles de match | 67 |
| 3.2.1.2 | Génération des trajectoires pseudo-aléatoires | 68 |
| 3.2.2 | Étude 3 - Influence de la double-tâche | 69 |
| 3.2.2.1 | Sélection des situations de jeu | 69 |
| 4 | Influence des trajectoires réelles sur l'effet lié à la pratique du football | 71 |
| 4.1 | Étude 1 - Évaluation du suivi visuel dans un environnement virtuel spéci- fique au football : Une étude basée sur une application web | 72 |
| 4.1.1 | Introduction | 72 |
| 4.1.2 | Méthodologie | 73 |
| 4.1.2.1 | Participants | 73 |
| 4.1.2.2 | Matériels | 74 |
| 4.1.2.3 | Procédure expérimentale | 74 |
| 4.1.2.4 | Manipulation du point de vue | 75 |
| 4.1.2.5 | Analyse des données | 76 |
| 4.1.3 | Résultats | 78 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.1.3.1 | Performance de suivi visuel | 78 |
| 4.1.3.2 | Analyse des caractéristiques situationnelles associées aux joueurs-cibles difficiles à suivre | 79 |
| 4.1.4 | Discussion | 82 |
| 4.1.4.1 | Performance de suivi visuel | 82 |
| 4.1.4.2 | Analyse des caractéristiques situationnelles associées aux joueurs-cibles difficiles à suivre | 85 |
| 4.1.5 | Conclusion | 87 |
| 4.2 | Étude 2 - Multiple-Players-Tracking en réalité virtuelle : Influence des tra- jectoires spécifiques au football et relation avec l'activité du regard | 88 |
| 4.2.1 | Introduction | 88 |
| 4.2.2 | Méthodologie | 88 |
| 4.2.2.1 | Participants | 88 |
| 4.2.2.2 | Matériels | 89 |
| 4.2.2.3 | Procédure | 89 |
| 4.2.2.4 | Classification des comportements du regard | 90 |
| 4.2.2.5 | Activité du regard | 92 |
| 4.2.2.6 | Caractéristiques spatiales des situations | 93 |
| 4.2.2.7 | Analyse de données | 93 |
| 4.2.3 | Résultats | 95 |
| 4.2.3.1 | Performance de suivi visuel | 95 |
| 4.2.3.2 | Activité du regard | 95 |
| 4.2.4 | Discussion | 100 |
| 4.2.4.1 | Performance de suivi visuel | 100 |
| 4.2.4.2 | Activité du regard | 100 |
| 4.2.5 | Conclusion | 103 |
| 5 | Influence de la double-tâche sur l'effet lié au niveau de compétition | 105 |
| 5.1 | Étude 3 - Multiple-Players-Tracking lors de la réception d'un ballon en réalité virtuelle : interférence d'une double-tâche cognitivo-motrice sur la performance de suivi visuel | 105 |
| 5.1.1 | Méthodologie | 106 |
| 5.1.1.1 | Participants | 106 |
| 5.1.1.2 | Matériels | 106 |

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.1.1.3 | Conditions expérimentales | 106 |
| 5.1.1.4 | Procédure | 108 |
| 5.1.1.5 | Analyse des données | 108 |
| 5.1.2 | Résultats | 109 |
| 5.1.3 | Discussion | 109 |
| 5.1.4 | Conclusion | 111 |
| 6 | Discussion Générale | 113 |
| 6.1 | Effet du niveau de pratique au football sur la performance de suivi visuel . | 114 |
| 6.1.1 | Résumé des résultats | 114 |
| 6.1.2 | Considération des facteurs confondants | 114 |
| 6.2 | Pertinence des caractéristiques de contextualisation de la tâche de suivi visuel aux contraintes du football | 116 |
| 6.2.1 | Résumé des résultats | 116 |
| 6.2.2 | Influence du dispositif de diffusion | 116 |
| 6.2.3 | Influence des trajectoires des joueurs virtuels | 117 |
| 6.2.4 | Influence d'une double-tâche cognitivo-motrice | 119 |
| 6.3 | Analyses complémentaires sur les facteurs influençant la performance de suivi visuel | 120 |
| 6.3.1 | Caractéristiques situationnelles de la tâche de suivi visuel | 120 |
| 6.3.2 | Activité du regard dans la tâche de suivi visuel | 121 |
| 6.4 | Apports pratiques | 123 |
| 6.5 | Limites | 124 |
| 6.6 | Perspectives | 125 |
| 6.6.1 | Évolutions de la tâche de suivi visuel | 126 |
| 6.6.2 | Entraînement du suivi visuel de multiples joueurs | 127 |
| | Contributions scientifiques | 129 |
| | Bibliographie | 131 |
| | Annexe | 155 |

TABLE DES FIGURES

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Capture d'écran de Fifa TV lors de la finale de la Coupe du monde 2018. Le gardien français subit le pressing de l'attaquant croate restreignant le temps pour décider de l'action à engager. Son choix final amènera à concéder un but. Même si ce but reste anecdotique sur le résultat final du match, la prise de décision a des répercussions directes sur la performance collective. | 22 |
| 1.1 | Présentation de la configuration expérimentale face à une vidéo projetée grandeur nature dans l'étude de Roca et al. (2011). Des situations à 11 contre 11 étaient filmées selon le point de vue d'un défenseur. Les vidéos délivrant ces situations étaient interrompues juste avant que le porteur de balle ne réalise une action. Le participant devait indiquer les intentions du porteur de balle et ce qu'il aurait fait en tant que défenseur. . | 26 |
| 1.2 | Présentation des stimuli délivrés sous forme filmée (a et b) ou PLD (c et d) dans l'étude de North et al. (2016). Les situations de matchs réels étaient filmées avec un point de vue dans les tribunes. Les situations pouvaient être éloignées (dans le demi-terrain au second plan) ou proches (dans le demi-terrain au premier plan). Le participant devait indiquer l'action du porteur de balle au moment où la vidéo s'arrêtait. . . . | 29 |
| 1.3 | Présentation des stimuli utilisés dans l'étude de Roca et al. (2013) sur l'anticipation des joueurs de football. Des situations de 11 contre 11 ont été filmées selon le point de vue d'un défenseur central. Les situations filmées pouvaient être éloignées (a) ou proches (b) du point de vue du défenseur central. Le participant devait indiquer à l'arrêt de la vidéo quelle action allait être exécutée par le porteur de balle. Le participant était équipé d'un oculomètre pour enregistrer son activité du regard pendant la visualisation de la situation. | 32 |

| | | |
|-----|--|----|
| 1.4 | Fenêtre d’attention des joueurs de sports « horizontaux » en noir et « verticaux » en gris dans l’étude de Hüttermann et al. (2014). Les sports horizontaux comprennent le football et le handball, et les sports verticaux comprennent le basketball et le volleyball. Ils sont décrits ainsi par les auteurs car les demandes attentionnelles sont essentiellement réparties respectivement sur l’axe horizontal et sur l’axe vertical du champ visuel. | 35 |
| 1.5 | Déroulé de la tâche de suivi visuel. A) Tous les objets sont statiques, 3 cibles sont indiquées en rouge. B) Les cibles redeviennent de même couleur que les perturbateurs, et tous les objets se déplacent pendant quelques secondes. C) L’observateur sélectionne toutes les cibles à suivre. | 37 |
| 1.6 | Schéma d’une démarche de contextualisation de la tâche de suivi visuel générique (à gauche) à une version contextualisée au football (à droite). Deux facteurs sont considérés dans cette illustration. 1) Adaptation des conditions de visualisation en passant d’un plan frontal sur écran à une répartition à 180° des objets mobiles dans un environnement 3D sur un plan horizontal. 2) Ajout des contraintes multitâches en interagissant avec le ballon pendant le suivi visuel. | 47 |
| 1.7 | Présentation des stimuli utilisés dans la version MOT-360° de l’étude Ehmman et al. (2021). A) Les objets virtuels sont des avatars humanoïdes de deux couleurs différentes et les cibles sont les avatars indiqués par un cercle au sol. B) Dans la phase de suivi, les avatars courent dans une direction aléatoire avant de revenir se placer en face du participant (les positions initiales et finales sont différentes). | 49 |
| 1.8 | Présentation de l’écran incurvé dans la tâche de MOT-180° (Chin et al., 2021). | 50 |
| 1.9 | Présentation d’un des premiers prototypes de HMD issu des travaux de Sutherland (1968). Finalement, ce dispositif est décrit aujourd’hui comme un système de réalité augmentée, <i>i.e.</i> permettant « l’augmentation des stimuli visuels naturels avec des indices simulés numériquement » (MILGRAM et al., 1995). | 54 |

| | | |
|------|---|----|
| 1.10 | Présentation des 4 exercices utilisés dans l'étude de Wood et al. (2021) pour comparer des joueurs de football. a) Le « rondo scan » demande de passer un ballon virtuel le plus rapidement possible en direction du but indiqué. b) Le « color combo » demande de toucher un ballon virtuel en approche avec le côté du pied correspondant à la couleur indiquée. c) Le « shoulder sum » demande de compter le nombre de joueurs de chaque couleur présent derrière le participant pour savoir vers quelle cible rediriger un ballon virtuel en approche. d) Le « pressure pass » demande de faire des passes vers des partenaires démarqués, sachant que des adversaires se rapprochent et s'éloignent du participant pour bloquer ou ouvrir les lignes de passes. | 59 |
| 2.1 | Contextualisation de la tâche de suivi visuel au football en RV. La RV est le support technologique utilisé pour générer des conditions de visualisation et d'interaction similaires à celles d'un match de football. . . . | 63 |
| 3.1 | Capture d'écran de l'environnement virtuel. Les joueurs virtuels sont matérialisés par des mannequins sans squelette qui se déplacent sur un terrain de football virtuel. | 66 |
| 3.2 | Présentation des 3 supports matériels utilisés pour délivrer la tâche de suivi visuel. À gauche, l'environnement est diffusé sur l'ordinateur personnel des participants de l'étude 1. Au centre, l'environnement est délivré dans un HMD pour l'étude 2. À droite, l'environnement est délivré dans un CAVE pour l'étude 3. | 66 |
| 3.3 | Génération des situations pseudo-aléatoires (UNSTRU) à partir des trajectoires réelles (STRU). Dans chaque graphique, les axes représentent les coordonnées du terrain de football en mètres avec l'origine au centre du terrain. | 69 |
| 4.1 | Présentation des conditions de réalisation de la tâche de suivi visuel pour l'étude 1. Le participant doit s'installer à une distance de l'écran équivalente à sa largeur pour standardiser les contraintes de visualisation. | 75 |

4.2 **Performance de suivi visuel par groupe dans les deux conditions expérimentales.** Les boxplots montrent la distribution des performances individuelles (points transparents) et un \blacklozenge représente la moyenne d'un groupe. 79

4.3 **Clustering des joueurs-cibles dans la condition STRU.** A) Biplot avec les variables étudiées et les joueurs-cibles individuels projetés sur les deux premières dimensions retournées par la PCA. Le gradient de couleur exprime la quantité de variance conservée sur ce plan pour chaque variable. La forme et la couleur des joueurs-cibles individuels sont données par rapport à leur cluster respectif calculé avec l'algorithme HCPC. B) Graphique radar avec les variables centrées réduites pour chaque cluster de joueurs-cibles retourné par l'algorithme HCPC. Plus une variable est proche du centre, plus sa valeur est faible et inversement. La ligne circulaire du milieu représente la valeur moyenne de chaque variable pour tous les joueurs-cibles. Plus la valeur d'un cluster est éloignée de la ligne centrale du cercle, plus les joueurs-cibles de ce cluster sont différents des autres. . . . 81

4.4 **Clustering des joueurs-cibles dans la condition UNSTRU.** A) Biplot avec les variables examinées et les joueurs-cibles individuels projetés sur les deux premières dimensions retournées par la PCA. B) Graphique radar avec les variables centrées-réduites pour chaque cluster de joueurs-cibles retourné par l'algorithme HCPC. 82

4.5 **Présentation des conditions de réalisation de la tâche de suivi visuel pour l'étude 2.** A) Installation du participant dans la zone synchronisée avec l'environnement virtuel. B) Capture d'écran du retour visuel du participant en temps réel. 90

4.6 **Schéma de la configuration expérimentale dans l’environnement virtuel.** L’humanoïde noir représente un participant, et les mannequins rouges et bleus représentent les joueurs virtuels. Par rapport au schéma, seuls le terrain et les joueurs virtuels étaient visibles pour le participant pendant l’expérience. Les lignes noires représentent l’espace de mouvement autorisé pour le participant, et les flèches grises représentent les axes de référence de l’espace virtuel 3D. Un axe correspond à la longueur du terrain, un autre à la largeur du terrain, et le dernier à l’axe vertical. La ligne orange correspond à la direction du regard du participant. L’angle du regard, illustré par l’arc de cercle orange, est calculé comme l’angle entre le vecteur de la direction du regard et l’axe longitudinal du terrain. La brique jaune représente le centroïde des joueurs-cibles, calculé comme l’emplacement moyen des joueurs-cibles. Pour chaque joueur-cible, un angle d’excentricité est calculé, par exemple, illustré par l’arc de cercle rose, comme l’angle entre le vecteur du participant vers une cible et le vecteur du participant vers le centroïde. Ces angles sont utilisés pour classer les joueurs-cibles en fonction de leur distance au centroïde. Sur le schéma, le joueur-cible indiqué est le plus proche du centroïde (R1). 91

4.7 **Regroupement des situations en trois clusters (violet, bleu et jaune, respectivement).** Le clustering est basé sur la dispersion spatiale moyenne des joueurs-cibles (axe des abscisses) et la distance moyenne qui séparent les joueurs-cibles des plus proches perturbateurs (axe des ordonnées). Les deux variables sont centrées-réduites. Les triangles représentent la valeur moyenne de chaque cluster. 94

4.8 **Performance du suivi visuel par groupe dans les deux conditions expérimentales.** 96

4.9 **Variables d’exploration visuelle par groupe (Soccer en bleu et Contrôle en rouge) et par cluster (1, 2 et 3 respectivement).** (A) Taux de recherche visuel moyen, (B) Amplitude moyenne des saccades, (C) Variabilité moyenne de l’exploration du regard, (D) Temps de séjour moyen par AOI, et (E) Score moyen de suivi visuel. 99

4.10 **Activité du regard de tous les joueurs de football (lignes bleues) et de tous les non-pratiquants (lignes oranges).** Les trois situations correspondant au cluster #1 (tracé de gauche), au cluster #2 (tracé central) et au cluster #3 (tracé de droite), respectivement. Les lignes noires en pointillés correspondent à la direction perçue d'un joueur-cible et les lignes cyans en pointillés correspondent à la direction relative du centroïde. . . . 101

5.1 **Présentation de la tâche de suivi visuel dans l'environnement virtuel projeté selon le point de vue d'un participant dans le CAVE.** Le participant a la possibilité de se déplacer sur toute la surface de ce CAVE (12x4m) mais doit démarrer chaque essai à partir du disque blanc indiqué au sol. 107

5.2 **Performance de suivi visuel des deux groupes de participants dans chaque condition expérimentale.** **** : p.value ajustée < 0.001. . . . 109

6.1 **Mesure subjective du caractère réaliste des situations de jeu.** Le score est donné après simple visualisation d'une situation ou suite à une tâche de suivi visuel. L'évaluation concerne uniquement le réalisme des trajectoires, et non pas celui des avatars utilisés pour représenter les joueurs virtuels. 119

6.2 **Évolution de la performance de suivi visuel sur les trois conditions expérimentales entre les évaluations T1 et T2.** T1 : évaluation pré-entraînement, T2 : évaluation post-entraînement, ST : condition simple-tâche de suivi visuel, DT-N : condition double-tâche de suivi visuel avec présence d'un ballon virtuel sans interception et DT-P : condition double-tâche de suivi visuel avec interception d'un ballon virtuel (voir section 5.1.1.3 pour les détails entre les conditions expérimentales). Chaque trait noir représente l'évolution de la performance de suivi visuel d'un gardien. . 128

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-----|---|-----|
| 4.1 | Description des caractéristiques prises en compte dans l'analyse exploratoire. | 78 |
| 4.2 | Performance moyenne de suivi visuel (et écart type) par groupe et condition. | 79 |
| 4.3 | Résultats des tests post-hoc sur les effets d'interaction entre les facteurs groupes et AOI. La première moitié du tableau montre les différences entre les groupes pour chaque AOI et la seconde moitié montre les différences entre les AOIs pour chaque groupe. | 98 |
| 6.1 | Performance de suivi visuel moyenne par sexe et par groupe de participants de l'étude 1. | 115 |
| A1 | Description des tests d'association des 11 variables par cluster dans la condition STRU. Le <i>v.test</i> est un indicateur statistique de la différence entre la moyenne du cluster et la moyenne globale pour la variable correspondante. La valeur <i>p</i> associée indique si la moyenne du cluster est significativement différente de la moyenne globale. | 155 |
| A2 | Description des tests d'association des 11 variables par cluster dans la condition UNSTRU. Le <i>v.test</i> est un indicateur statistique de la différence entre la moyenne du cluster et la moyenne globale pour la variable correspondante. La valeur <i>p</i> associée indique si la moyenne du cluster est significativement différente de la moyenne globale. | 156 |
| A3 | Temps de séjour moyen (et déviation standard) par groupe, condition et AOI. | 158 |
| A4 | Résultats des tests post-hoc sur les effets d'interaction entre les facteurs cluster et AOI. | 159 |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La recherche scientifique sur la performance sportive vise à comprendre ce qui distingue les joueurs élites capables de constamment démontrer une performance supérieure à celle des autres. Dans le monde du football, cette démarche fut initiée 50 ans plus tôt en Angleterre. Armé d'un stylo, d'un carnet et d'un chronomètre, le professeur Tom Reilly répertoriait et annotait depuis les tribunes les actions exécutées par les joueurs au cours d'un match (HUGHES & FRANKS, 2005 ; JAMES, 2006). Des estimations statistiques pouvaient être émises sur les styles de jeu associés à la réussite d'une équipe, ce qui apportait des arguments dans les choix tactiques de l'entraîneur (REEP & BENJAMIN, 1968 ; HUGHES & FRANKS, 2005). Depuis, les recherches se ramifient pour identifier les composants soutenant les comportements observables sur le terrain et les moyens de les développer (HUGHES & BARTLETT, 2002).

« Lève la tête ! Vois plus loin ! »

À l'image des consignes données par l'entraîneur, être attentif aux éléments pertinents de l'environnement est nécessaire pour agir convenablement dans les situations de jeu au football. Les difficultés dans cet exercice résident, entre autres, dans le nombre d'éléments à percevoir, leur dispersion sur un large terrain, leur densité, et leur déplacement continu. Les compétences perceptivo-cognitives décrivent les processus de collecte et d'intégration des informations issues de l'environnement pour sélectionner et exécuter une action appropriée par rapport à ses propres connaissances et compétences motrices (MANN et al., 2007 ; SCHUMACHER et al., 2018). L'expertise perceptivo-cognitive se traduit alors par la capacité d'un individu à précisément anticiper l'occurrence d'un événement et à spontanément saisir les opportunités d'agir favorables au succès de son équipe. Comme illustration, un gardien doit décider rapidement quoi faire du ballon lorsqu'il subit le pressing d'un adversaire (Fig. 1). Pour cela, le choix adéquat implique une attribution ha-

bile de l'attention visuelle entre les éléments de l'environnement (JANELLE & HATFIELD, 2008). L'attention visuelle est décrite comme un sous-processus perceptif permettant une perception consciente de certains stimuli présents dans le champ visuel (DEHAENE et al., 2006 ; MEMMERT, 2009). Une mauvaise allocation de l'attention peut amener à manquer un événement important et induire une action contre-productive (MEMMERT, FURLEY et al., 2007), voir même altérer l'équilibre postural et accroître le risque de blessure (REN et al., 2022). Ces détériorations dans l'activité sont d'autant plus préoccupantes avec l'accumulation de fatigue physique et mentale sur 90 min de jeu (BALAGUÉ et al., 2012 ; SMITH et al., 2018 ; SCHMIT & BRISSWALTER, 2020).



FIGURE 1 – Capture d'écran de Fifa TV lors de la finale de la Coupe du monde 2018. Le gardien français subit le pressing de l'attaquant croate restreignant le temps pour décider de l'action à engager. Son choix final amènera à concéder un but. Même si ce but reste anecdotique sur le résultat final du match, la prise de décision a des répercussions directes sur la performance collective.

Pour répondre au besoin de développer les compétences perceptivo-cognitives, telle que l'attention visuelle, une course technologique se remarque aujourd'hui avec la commercialisation de nombreux outils numériques (APPELBAUM & ERICKSON, 2018). Cependant, une lettre ouverte de 2014, mais toujours d'actualité (www.cognitivetrainingdata.org), exposa la controverse concernant les démonstrations scientifiques sur l'efficacité de ces outils pour améliorer la performance sportive finale (SIMONS et al., 2016). À l'inverse de ce qui

est observé aujourd'hui, l'efficacité des outils numériques dans le développement des sportifs devrait être attestée scientifiquement avant leur déploiement dans les clubs (BEAVAN, 2019).

Que ce soit dans le secteur académique, pour identifier les mécanismes impliqués dans l'expertise sportive, ou dans le secteur industriel, pour vérifier la capacité d'un outil à retranscrire l'activité sportive, les questions restent ouvertes sur les modalités d'évaluation et d'entraînement des compétences perceptivo-cognitives contribuant au succès sportif. Ce travail de thèse se focalise sur l'évaluation standardisée et reproductible de l'attention visuelle chez les joueurs de football. Son originalité émerge du constat que les protocoles d'évaluation actuels considèrent rarement les contraintes du terrain. Or, un individu ne pourra exprimer son expertise que dans les conditions lui permettant de le faire. À cet égard, les travaux menés s'appuieront sur les environnements virtuels et les technologies de réalité virtuelle pour simuler des situations de jeu et adapter une tâche de suivi visuel aux contraintes attentionnelles du football.

Le chapitre 1 de ce manuscrit présente un état de l'art en trois parties sur l'évaluation de l'attention visuelle des joueurs de football. Tout d'abord, cet état de l'art décrit le rôle de l'attention visuelle dans la prise d'information au football. La tâche de suivi visuel pour évaluer l'attention visuelle et son lien avec la performance sportive sont ensuite présentés. Enfin, la pertinence de la réalité virtuelle pour maintenir un contexte écologique dans l'évaluation standardisée de la performance sportive est mise en avant. **Le chapitre 2** synthétise les connaissances issues de la littérature pour mettre en avant les objectifs majeurs de ce travail. **Le chapitre 3** décrit la tâche de suivi visuel commune aux 3 études menées. **Les chapitres 4 et 5** présentent les résultats des études menées sur l'influence respective des trajectoires réelles de match et de la double-tâche sur la performance de suivi visuel en fonction du niveau de pratique au football. Enfin, **le chapitre 6** apporte une discussion générale sur l'ensemble des travaux effectués.

ÉTAT DE L'ART

1.1 Prise d'information et attention visuelle au football

Les joueurs et joueuses de football sont confrontés à un environnement complexe, dynamique et imprévisible avec de fortes contraintes spatio-temporelles pour percevoir et agir. La prise d'information permet de connaître la disposition des partenaires et adversaires sur le terrain, mais également d'identifier leur intention. Ces informations nourrissent l'anticipation et la prise de décision (MANN et al., 2007). Ces processus représentent un avantage compétitif pour se préparer à l'évolution d'une situation et gagner du temps sur son adversaire.

L'évaluation perceptivo-cognitive est cruciale pour la détection de talent et l'optimisation des interventions destinées à l'acquisition de ces compétences (ALI, 2011). Deux cadres d'analyse existent pour identifier et comprendre les mécanismes perceptivo-cognitifs sous-jacents à la performance sportive (KALÉN et al., 2021). D'une part, *l'approche générale* comprend les évaluations d'une fonction perceptivo-cognitive générale, *e.g.* l'attention visuelle (VOSS et al., 2010). D'autre part, *l'approche spécifique* comprend les évaluations d'une compétence perceptivo-cognitive spécifique à un domaine sportif, *e.g.* la prise de décision (MANN et al., 2007). L'évaluation sous l'approche spécifique peut-être réalisée *in situ* sur du jeu réduit, assurant un lien étroit avec les conditions de match (SARMENTO et al., 2018 ; PIGGOTT et al., 2019) ou en laboratoire dans des mises en situation sous des conditions standardisées et reproductibles (F. CASANOVA et al., 2009). Cette deuxième approche méthodologique, dite de *la performance experte* (ERICSSON & SMITH, 1991 ; ERICSSON & WILLIAMS, 2007), consiste à étudier le comportement des individus face à une image (HELSEN & STARKES, 1999) ou une vidéo en grandeur nature d'une situation

de jeu réelle (*e.g.* NORTH et al., 2016), ou pré-construite (*e.g.* VAEYENS et al., 2007a). La figure 1.1 montre la configuration expérimentale de ROCA et al. (2011) pour évaluer l’anticipation et la prise de décision des joueurs de football.



FIGURE 1.1 – Présentation de la configuration expérimentale face à une vidéo projetée grandeur nature dans l’étude de Roca et al. (2011). Des situations à 11 contre 11 étaient filmées selon le point de vue d’un défenseur. Les vidéos délivrant ces situations étaient interrompues juste avant que le porteur de balle ne réalise une action. Le participant devait indiquer les intentions du porteur de balle et ce qu’il aurait fait en tant que défenseur.

Dans ces mises en situation, la littérature scientifique montre une capacité à anticiper un évènement en tant que défenseur et à choisir une action créative pertinente en tant que porteur de balle plus précisément et rapidement chez les joueuses et joueurs de haut niveau par rapport à celles et ceux de niveau moindre (HELSEN & PAUWELS, 1993; WILLIAMS et al., 1994; WARD & WILLIAMS, 2003; VAEYENS et al., 2007a; VAEYENS et al., 2007b; NORTH et al., 2009; NORTH et al., 2011; ROCA et al., 2011; 2013; BELLING et al., 2015; NORTH et al., 2016; ROCA et al., 2018; BASEVITCH et al., 2020; ROCA et al., 2021). Ces meilleures performances ne sont pas seulement le résultat d’une pratique

prolongée. Elles dépendent également de la capacité individuelle à bénéficier d'un entraînement (WILLIAMS & DAVIDS, 1995; VAEYENS et al., 2007b), du type de contraintes rencontrées pendant l'apprentissage, comme les instructions, la qualité des oppositions (WARD & WILLIAMS, 2003), ou encore le poste de jeu (WILLIAMS et al., 2008). Cette section présente les données de la littérature sur les indices exploités par les joueurs au football et la manière de les collecter.

1.1.1 Sources d'information en situation de jeu

Les informations exploitées par les joueurs sont de différentes natures. Certaines appartiennent au contexte encadrant la situation vécue, comme l'état de forme, le score du match, les instructions de l'entraîneur (LEVI & JACKSON, 2018). D'autres émergent et disparaissent au fil de la situation, tels que les indices posturaux et les déplacements relatifs entre joueurs (WILLIAMS, 2000).

1.1.1.1 Utilisation des indices posturaux

Lors des études en laboratoire, les stimuli projetés sont manipulés pour identifier les indices posturaux utilisés et les moments de leur extraction (SMEETON et al., 2019). Les paradigmes *d'occultations temporelle* et *spatiale* consistent respectivement à éditer les vidéos diffusées pour interrompre une situation à différents instants et retirer certains éléments de l'environnement. En observant des variations dans le comportement entre différentes conditions expérimentales, il est ainsi possible d'estimer indirectement à quel point un indice influence la performance d'un individu (SMEETON et al., 2019).

À l'image du duel entre le tireur de penalty et le gardien de but, l'exploitation d'indices posturaux s'illustre typiquement dans les situations avec les plus fortes contraintes spatio-temporelles pour percevoir et agir (SAVELSBERGH et al., 2005; ROCA et al., 2013; NORTH et al., 2016). Face à une vidéo interrompue quelques millisecondes avant ou après le contact entre le ballon et le pied du tireur, des joueurs sont comparés sur l'anticipation de la direction du penalty en fonction de leur expérience (WILLIAMS, 2000). Une meilleure performance est constatée chez les joueurs expérimentés par rapport à ceux moins expérimentés uniquement lorsque la vidéo est interrompue avant le départ du ballon (WILLIAMS, 2000). Avec l'expérience, les joueurs et joueuses parviennent à lire les intentions d'un individu à partir de sa posture et de ses mouvements préparatoires (WILLIAMS, 2000). Bien que percevoir prématurément les intentions d'un adversaire est important, attendre le der-

nier moment avant de s’élancer en fonction de ses capacités physiques permet de conforter son choix avec davantage d’informations (SAVELSBERGH et al., 2005; DICKS et al., 2010), et de se préserver des feintes (BRAULT et al., 2012; BISHOP et al., 2013). Au football, ce constat est essentiellement observé dans le cas du penalty (WILLIAMS, 2000), mais le même phénomène est supposé dans les interactions entre joueurs de champ (ROCA et al., 2013).

CAUSER et al. (2017) ont demandé à des gardiens d’anticiper un tir de penalty face à des vidéos éditées de façon à présenter le corps entier du tireur, ou seulement certaines parties comme l’articulation des hanches. Même si les résultats montrent une anticipation plus précise lorsque le corps entier est visible, la performance des gardiens professionnels reste supérieure au simple effet du hasard lorsque seules les hanches sont visibles. Ce qui n’est pas le cas pour les gardiens amateurs (CAUSER et al., 2017). En plus de mettre en évidence les indices posturaux exploités par les joueurs de haut niveau, ces résultats montrent leur capacité à s’adapter aux indices disponibles pour agir le plus judicieusement possible.

1.1.1.2 Perception des déplacements relatifs entre joueurs

Même si un joueur dispose de la liberté d’aller où il veut et quand il veut (dans la limite des règles), un déplacement rationnel reste dépendant de celui des autres joueurs et du ballon (ARAÚJO & DAVIDS, 2016). NORTH et al. (2016) ont comparé la capacité des joueurs de football à anticiper l’issue d’une situation face à des séquences vidéo de jeu à 11 contre 11, ou face à des séquences vidéo éditées de manière à remplacer les joueurs par de simples points, *i.e.* au format *point-light-display* (PLD). En PLD, l’orientation du corps et la gestuelle sont supprimées (Fig. 1.2). Bien que l’anticipation soit détériorée dans la condition PLD chez tous les participants, les semi-professionnels ont continué de montrer une anticipation plus précise que les joueurs amateurs en absence d’indices posturaux (NORTH et al., 2016). Il semble ainsi possible d’anticiper l’issue d’une situation uniquement à partir des déplacements relatifs entre joueurs. Ces résultats illustrent une nouvelle fois la capacité des joueurs professionnels à s’adapter aux indices visuels disponibles. À l’inverse des indices posturaux, l’exploitation des déplacements relatifs semble prépondérante lorsque les joueurs et le ballon à percevoir sont éloignés du point de vue de la caméra (ROCA et al., 2013; NORTH et al., 2016). Dans ces conditions, les contraintes spatio-temporelles pour percevoir et agir sont moins importantes, et laissent la possibilité

de percevoir un grand nombre d'indices.

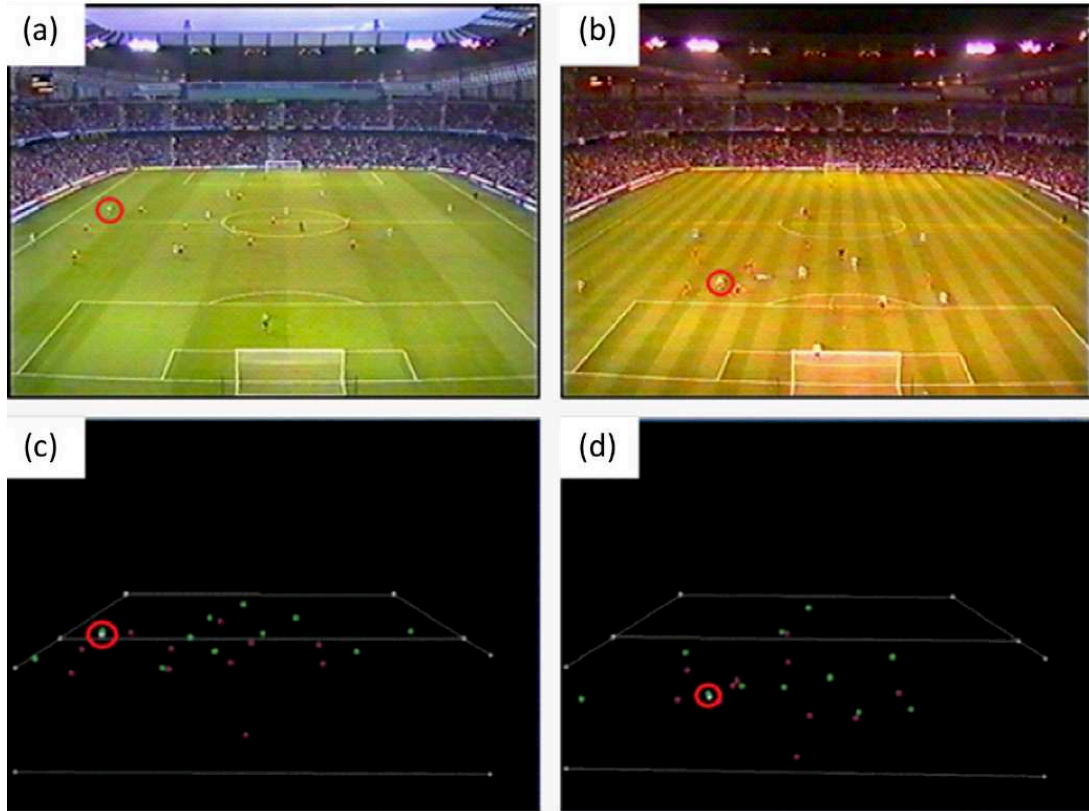


FIGURE 1.2 – Présentation des stimuli délivrés sous forme filmée (a et b) ou PLD (c et d) dans l'étude de North et al. (2016). Les situations de matchs réels étaient filmées avec un point de vue dans les tribunes. Les situations pouvaient être éloignées (dans le demi-terrain au second plan) ou proches (dans le demi-terrain au premier plan). Le participant devait indiquer l'action du porteur de balle au moment où la vidéo s'arrêtait.

La lecture des déplacements relatifs entre joueurs est supposée possible par l'acquisition avec l'entraînement de connaissances spécifiques permettant de reconnaître des configurations familières entre plusieurs joueurs au sein d'une situation. Ces connaissances faciliteraient la détection et l'intégration d'indices significatifs pour prédire l'évolution d'une situation (NORTH & WILLIAMS, 2019). Cette idée provient de premières observations sur la capacité d'un Maître d'échecs à systématiquement choisir un mouvement pertinent par rapport à l'état de l'échiquier (CHASE & SIMON, 1973). Comparé à des joueurs moins aguerris, le Maître d'échecs parvenait à restituer précisément la disposition des pièces après les avoir mémorisées durant 5s (CHASE & SIMON, 1973). Cependant, cet avantage disparaissait lorsque les pièces étaient placées aléatoirement sur l'échiquier,

ne présentant aucune relation logique entre elles (CHASE & SIMON, 1973). La performance supérieure du Maître d’échecs ne semblait donc pas liée à des capacités innées de mémorisation supérieure.

Depuis, les tâches de mémorisation *pattern recall* et *pattern recognition* ont été utilisées pour étudier la perception des mouvements collectifs au football (WILLIAMS et al., 2006 ; NORTH et al., 2009 ; NORTH et al., 2011). À partir des situations qui leur sont présentées en vidéo, les participants doivent restituer la dernière position visible des joueurs (*pattern recall*) ou indiquer si la situation a préalablement déjà été visionnée (*pattern recognition*). Un effet de l’expertise est retrouvé dans ces deux tâches avec une meilleure performance de mémorisation chez les joueurs professionnels par rapport à des joueurs amateurs (WILLIAMS & DAVIDS, 1995 ; WILLIAMS et al., 2006 ; NORTH et al., 2009 ; NORTH et al., 2011 ; WILLIAMS et al., 2012), même face à des stimuli au format PLD (WILLIAMS et al., 2006 ; NORTH et al., 2009 ; NORTH et al., 2011). Bien qu’il soit supposé que ces tests capturent certains aspects de la perception requise sur le terrain (van MAARSEVEEN et al., 2015), l’association entre la performance mesurée sur ces exercices de mémorisation et celle mesurée sur une tâche d’anticipation en laboratoire (NORTH et al., 2009 ; NORTH et al., 2011 ; van MAARSEVEEN et al., 2018) ou en jeu réduit (van MAARSEVEEN et al., 2018) n’est pas toujours clairement établie. Des interrogations se posent alors sur la relation entre la nature des mécanismes évalués et la performance sportive (WILLIAMS & ERICSSON, 2005), ou encore sur la capacité des tests basées sur une diffusion des situations en vidéo à retranscrire les conditions visuelles sous lesquelles cette performance est réalisée (van MAARSEVEEN et al., 2018).

1.1.2 **Activité du regard et attention visuelle au football**

Le système visuel est l’entrée sensorielle prépondérante dans la collecte d’informations au football. L’activité du regard fait donc l’objet de recherches scientifiques depuis plusieurs années pour déterminer sa contribution dans la performance sportive (MANN et al., 2019). Son analyse est possible grâce aux enregistrements oculométriques réalisés *in situ* (AKSUM et al., 2021) ou lors de tâches d’anticipation et de prise de décision en laboratoire (VAEYENS et al., 2007a). Ces enregistrements sont ensuite traités pour étudier les stratégies d’exploration visuelle associées à la réussite des tâches demandées (KREDEL et al., 2017 ; KLOSTERMANN & MOEINIRAD, 2020).

1.1.2.1 Description des comportements d'exploration visuelle

L'orientation du regard résulte des mouvements du corps, de la tête et des yeux (LAND, 1999; HENDERSON, 2003; MCGUCKIAN et al., 2018b). Le contrôle du regard est impératif compte tenu des capacités respectives des visions centrales et périphériques (KLOSTERMANN et al., 2020). La vision centrale, ou fovéale, ne concerne qu'une part extrêmement réduite du champ visuel ($<2-3^\circ$), mais elle permet le traitement détaillé d'un élément de l'environnement (VATER et al., 2019). La vision périphérique, couvrant le reste du champ visuel, est très sensible aux mouvements provoqués par les déplacements des objets dans l'environnement et ceux de l'observateur lui-même.

Les comportements du regard, *e.g.* la fixation et la saccade, ont eu différentes descriptions dans la littérature (LAPPI, 2016). Initialement, le regard fut examiné dans des conditions extrêmement restrictives ne permettant à un individu de ne bouger que ses yeux face à un écran, sa tête immobilisée à l'aide d'une mentonnière. Les comportements du regard étaient donc classifiés selon les événements oculomoteurs exprimés dans un repère égocentré. Par exemple, la fixation était décrite comme le fait de conserver les yeux fixes par rapport au référentiel de la tête (SALVUCCI & GOLDBERG, 2000). Cependant, le football implique de percevoir des indices mobiles dans un environnement 3D lorsque l'observateur se déplace également lui-même (MCGUCKIAN et al., 2018b). C'est dans ce cadre de travail que se situe notre état de l'art. Il apparaît dès lors plus judicieux de décrire le regard et ses comportements associés, d'un point de vue fonctionnel, dans le référentiel monde (LAPPI, 2016). Ainsi, dans la suite de ce manuscrit, le regard s'entend comme la ligne de vue 3D prenant la fovéa pour origine et se terminant sur un point de fixation dans l'espace. Une fixation décrit le fait de maintenir le regard en direction d'un objet ou d'un espace (pouvant impliquer une rotation lente de la tête et/ou des yeux). On parle alors d'une fixation du regard et non pas seulement d'une fixation des yeux (LAPPI, 2016). Une saccade décrit quant à elle le fait de réorienter rapidement la direction de la fovéa pour changer de point de fixation dans l'espace.

1.1.2.2 Les stratégies d'exploration visuelle

L'analyse classique du regard compare qualitativement (*i.e.* quelle source est fixée) et quantitativement (*i.e.* nombre et durée de fixation) l'activité du regard des sportifs en fonction des contraintes de la tâche et de leur niveau de compétences sur celle-ci (MANN et al., 2019).

ROCA et al. (2013) ont comparé l'activité du regard de joueurs professionnels et amateurs dans une tâche d'anticipation face à des vidéos de situations à 11 contre 11. Les situations filmées étaient éloignées (demi-terrain au second plan) ou proches (demi-terrain au premier plan) du point de vue d'un défenseur central (Fig. 1.3).



FIGURE 1.3 – Présentation des stimuli utilisés dans l'étude de Roca et al. (2013) sur l'anticipation des joueurs de football. Des situations de 11 contre 11 ont été filmées selon le point de vue d'un défenseur central. Les situations filmées pouvaient être éloignées (a) ou proches (b) du point de vue du défenseur central. Le participant devait indiquer à l'arrêt de la vidéo quelle action allait être exécutée par le porteur de balle. Le participant était équipé d'un oculomètre pour enregistrer son activité du regard pendant la visualisation de la situation.

Face aux situations éloignées, les joueurs professionnels ont mené une exploration visuelle active, *i.e.* avec de nombreuses fixations de courte durée sur plusieurs localisations différentes. Une telle activité assure le traitement détaillé de nombreux indices dispersés

dans l'espace (VAEYENS et al., 2007a) et semble adaptée à la perception des déplacements relatifs entre joueurs (ROCA et al., 2013). Il est probable que ces fixations alternaient entre un pivot visuel et les différents indices visuels avoisinants (VATER et al., 2019). Ce pivot visuel correspond à une localisation centrale, pouvant être sur ou entre des éléments de l'environnement, qui minimise l'amplitude des saccades entre les points de fixation. De plus, ce type d'exploration active favoriserait la créativité en élargissant la zone d'exposition de l'attention visuelle pour choisir une action pertinente à réaliser (ROCA et al., 2018). En utilisant des centrales inertielles pour enregistrer les mouvements de tête lors de situations *in situ*, MCGUCKIAN et al. (2018a) observent qu'une exploration active (*i.e.* hautes fréquences et amplitudes de rotation de tête) permet de considérer davantage d'opportunités d'actions permises par l'environnement.

À l'inverse, face aux situations visualisées à proximité, une exploration visuelle ralentie est constatée, avec peu de fixations mais de longues durées et sur un nombre réduit de localisations différentes (ROCA et al., 2013). Une réduction de l'activité d'exploration visuelle en fonction de la pression temporelle est également constatée dans une analyse vidéo des mouvements de tête réalisés lors de compétitions (JORDET et al., 2020). Une explication tiendrait au fait qu'une période d'inhibition visuelle où aucune information ne peut être intégrée est induite lors d'une saccade oculaire ou d'une rotation rapide de tête. Dans les situations les plus contraignantes, ancrer son regard entre les sources d'intérêt limite l'interruption de la prise d'information et permet de surveiller les indices avoisinants en vision périphérique (VATER et al., 2019). En comparaison, l'activité du regard des joueurs amateurs varie peu entre les situations perçues proches et éloignées (ROCA et al., 2013). Cela souligne une meilleure capacité des joueurs de haut niveau à adapter leur activité d'exploration visuelle et leur stratégie de collecte de l'information en fonction des contraintes de la situation (ROCA et al., 2013; VATER et al., 2019).

Ainsi, la vision périphérique participe à la désignation de la future localisation du point de fixation (pivot visuel) ou à la surveillance d'un ou plusieurs éléments dans l'espace (ancrage du regard) (NUTHMANN, 2014; VATER et al., 2019; VATER et al., 2020). Ces 2 fonctions sont possibles grâce à la dissociation entre la direction du regard et celle de l'attention visuelle. La direction du regard reflète les intentions d'un individu et facilite la résolution d'interactions multi-personnelles, comme lors de la locomotion dans la rue (EMERY, 2000; DICKS et al., 2016). À l'inverse, elle peut servir à masquer ses réelles intentions, comme lors des passes à l'aveugle (GÜLDENPENNING et al., 2017). Savoir

où se dirige l’attention visuelle est finalement aussi important qu’enregistrer l’activité du regard pour examiner la prise d’information (VATER et al., 2020), mais cela reste méthodologiquement difficile.

1.1.2.3 Capture de l’attention visuelle

Un contrôle non adapté de l’attention dans une scène encombrée de plusieurs éléments provoque le phénomène contre-productif de *cécité d’inattention*, *i.e.* l’incapacité de détecter un objet ou événement pourtant bien présent dans le champ visuel (SIMONS & CHABRIS, 1999 ; FURLEY et al., 2010). Afin de mesurer la capacité individuelle à porter son attention sur plusieurs indices visuels simultanément, des méthodologies complémentaires à l’oculométrie et à la manipulation des stimuli disponibles sont nécessaires.

Typiquement, la tâche de *fenêtre d’attention* quantifie la dimension maximale du focus attentionnel d’un individu (HÜTTERMANN & MEMMERT, 2017). Celle-ci demande de précisément distinguer deux éléments séparés sur l’axe horizontal, sur l’axe vertical ou sur les diagonales d’un écran. HÜTTERMANN et al. (2014) remarquent une plus grande fenêtre d’attention chez des joueurs de sports collectifs par rapport à des non-pratiquants. Ce qui suggère une perception des régions plus excentrées en vision périphérique chez les joueurs de sports collectifs (HÜTTERMANN et al., 2014). De plus, une perception plus étendue sur l’axe horizontal est rapportée chez des joueurs de football et de handball, par rapport à des joueurs de volleyball et de basketball (Fig. 1.4). À l’inverse, les joueurs de volleyball et de basketball ont démontré une perception plus étendue sur l’axe vertical que les joueurs de football et de handball (Fig. 1.4). Un élargissement de l’attention visuelle pourrait faciliter la prise de décision au football (HÜTTERMANN & MEMMERT, 2017), et serait possible par un entraînement spécifique sur ou en dehors du terrain (HÜTTERMANN & MEMMERT, 2018). Ces résultats indiquent que des aspects plus fondamentaux de l’attention visuelle seraient liés à la performance au football (FURLEY & MEMMERT, 2011).

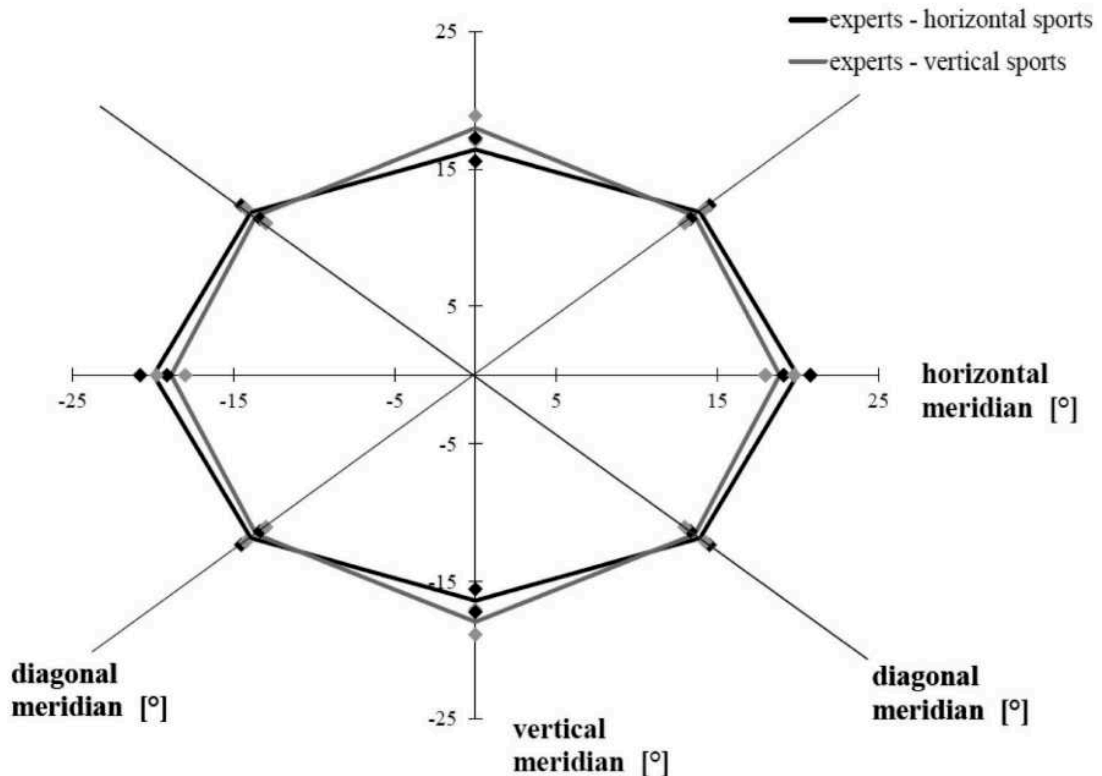


FIGURE 1.4 – Fenêtre d'attention des joueurs de sports « horizontaux » en noir et « verticaux » en gris dans l'étude de Hüttermann et al. (2014). Les sports horizontaux comprennent le football et le handball, et les sports verticaux comprennent le basketball et le volleyball. Ils sont décrits ainsi par les auteurs car les demandes attentionnelles sont essentiellement réparties respectivement sur l'axe horizontal et sur l'axe vertical du champ visuel.

Résumé

Cette première partie a mis en avant l'utilisation des indices posturaux et des déplacements relatifs entre joueurs dans la performance au football. Elle a présenté également la capacité des joueurs expérimentés à adapter leur activité d'exploration visuelle aux contraintes de la situation. Cependant, les sports collectifs exigent de distribuer son attention entre plusieurs indices de l'environnement et entre plusieurs tâches (*e.g.* perception des autres pendant la conduite de balle). Des méthodologies complémentaires à l'oculométrie et à la manipulation des stimuli disponibles sont nécessaires pour évaluer tous les aspects de l'attention visuelle contribuant à la performance sportive.

1.2 Mesure de l’attention visuelle dynamique en laboratoire : la tâche de suivi visuel

En opposition à l’approche spécifique, l’approche générique *basée sur les composants cognitifs* s’intéresse à la relation entre la performance sportive et les fonctions perceptivo-cognitives fondamentales, non-spécifiques à un domaine d’activité précis mais requises pour accéder au haut niveau (VOSS et al., 2010 ; SCHARFEN & MEMMERT, 2019). L’importance de plusieurs mécanismes perceptivo-cognitifs fondamentaux dans la performance au football est examinée à travers cette approche, mais les résultats ne seront pas présentés dans ce manuscrit pour se concentrer sur la mesure de l’attention visuelle (voir VERBURGH et al., 2014 ; VESTBERG et al., 2017 ; SCHUMACHER et al., 2018 ; BEAVAN et al., 2019). L’attention visuelle est décrite ici comme un sous-processus perceptif permettant la perception consciente de certains stimuli du champ visuel (DEHAENE et al., 2006 ; MEMMERT, 2009). Elle est caractérisée par différents aspects (MEMMERT, 2009). Parmi eux, *l’attention sélective* décrit l’aptitude à diriger l’attention sur un indice particulier pour un traitement détaillé au détriment des autres. *L’attention soutenue* décrit l’aptitude à maintenir l’attention sélective dans le temps. *L’attention divisée* décrit la capacité à porter une attention sélective sur plusieurs éléments de l’environnement (CAVANAGH & ALVAREZ, 2005) ou la capacité à partager des ressources attentionnelles entre plusieurs tâches réalisées simultanément (ABERNETHY et al., 2007 ; BERNIER et al., 2009). Au regard des contraintes du football, ce travail s’intéresse à la capacité d’un individu à allouer dynamiquement au cours du temps son attention visuelle pour collecter des informations sur plusieurs sources mobiles de l’environnement.

Dans cette perspective, les recherches qui inspirent ce travail s’appuient traditionnellement sur la tâche de suivi visuel de multiples objets (MOT : *Multiple-Object-Tracking*), initialement utilisée par PYLYSHYN et STORM (1988) pour étudier les mécanismes de l’attention visuelle. Depuis, plusieurs études se basent sur cette tâche pour examiner la contribution de l’attention visuelle à la performance dans les sports collectifs. Cette section présente la tâche de suivi visuel, la relation entre la performance de suivi visuel et la performance sportive, puis finalement les niveaux de transfert observés d’un entraînement basé sur le suivi visuel.

1.2.1 Le suivi visuel de multiples objets

La tâche de suivi visuel demande de surveiller des objets cibles qui se déplacent aléatoirement pendant quelques secondes dans un espace virtuel clos (voir la revue de MEYERHOFF et al. (2017)). Des objets de même apparence, appelés perturbateurs, sont présents pour perturber l'activité de suivi. La ressemblance entre les cibles et les perturbateurs oblige une allocation habile de l'attention visuelle dans l'espace et au cours du temps pour éviter de perdre une cible ou de la confondre avec un perturbateur (DREW et al., 2013).

La tâche de suivi visuel de multiples objets

Au début d'un essai, tous les objets (cibles et perturbateurs) sont statiques, et les cibles sont temporairement désignées (par un changement de couleur dans la figure 1.5-A). Ensuite, tous les objets se déplacent pendant quelques secondes avant de s'immobiliser (Fig. 1.5-B). Deux modalités de réponses sont possibles : sélectionner toutes les cibles à suivre (comme dans la figure 1.5-C) ou indiquer si un objet désigné aléatoirement est effectivement une cible ou non. La seconde méthode est privilégiée pour maintenir l'effet du hasard entre les conditions expérimentales lorsque le ratio entre le nombre de cibles et le nombre de perturbateurs est manipulé. Dans les deux cas, la performance de suivi visuel est mesurée comme le ratio entre le nombre de cibles correctement retrouvées et le nombre total de cibles à suivre (MEYERHOFF et al., 2017).

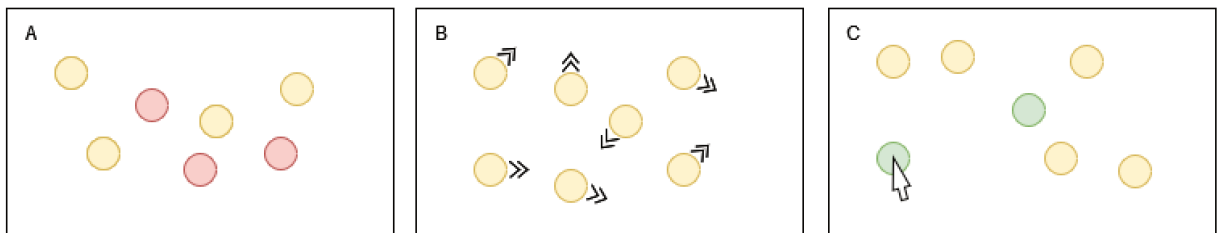


FIGURE 1.5 – **Déroulé de la tâche de suivi visuel.** A) Tous les objets sont statiques, 3 cibles sont indiquées en rouge. B) Les cibles redeviennent de même couleur que les perturbateurs, et tous les objets se déplacent pendant quelques secondes. C) L'observateur sélectionne toutes les cibles à suivre.

Une réduction de la performance de suivi visuel est remarquée lorsqu'une seconde tâche sollicitant des ressources attentionnelles (*e.g.* réagir rapidement à un signal sonore)

est réalisée pendant la phase de suivi (ALLEN et al., 2004; TOMBU & SEIFFERT, 2008). Ces observations soutiennent l’implication de l’attention dans l’activité de suivi visuel (CAVANAGH & ALVAREZ, 2005; TOMBU & SEIFFERT, 2008). La performance mesurée dans un tel exercice peut ainsi fournir un indicateur numérique sur la capacité d’un individu à allouer dynamiquement son attention visuelle entre des objets mobiles. À noter que cette performance dépend aussi d’autres mécanismes perceptivo-cognitifs comme la mémoire de travail (HARRIS et al., 2020b). De plus, la performance mesurée est conditionnée par les caractéristiques situationnelles de la tâche et par l’activité du regard au cours de la phase de suivi.

1.2.1.1 Influence des caractéristiques situationnelles

Dans une approche théorique basée sur le partage des ressources attentionnelles, un coût attentionnel est associé à chaque cible, et le risque d’erreur augmente lorsque le coût cumulé de toutes les cibles dépasse les ressources attentionnelles disponibles de l’observateur (ALVAREZ & FRANCONERI, 2007; TOMBU & SEIFFERT, 2008; HOLCOMBE & CHEN, 2012). Au-delà du nombre de cibles à suivre (PYLYSHYN & STORM, 1988), du nombre de perturbateurs à abstraire (BETTENCOURT & SOMERS, 2009), ou de leur ressemblance avec les cibles (FERIA, 2012), la difficulté de l’exercice dépend de facteurs situationnels régulant les demandes attentionnelles comme la dispersion entre les cibles (SHIM et al., 2008), leur proximité avec un perturbateur (IORDANESCU et al., 2009) et leur vitesse de déplacement (HOLCOMBE & CHEN, 2012).

Les demandes attentionnelles augmentent avec la vitesse de déplacement. Si une cible se déplace suffisamment vite, il n’est plus possible d’en suivre une deuxième avec précision (HOLCOMBE & CHEN, 2012). En plus de dégrader par elle-même la capacité de suivi visuel (TOMBU & SEIFFERT, 2011), la vitesse augmente les périodes de proximité entre cibles et perturbateurs (FRANCONERI et al., 2010; MEYERHOFF et al., 2016). Cette proximité génère une interférence visuelle qui peut devenir critique lorsque la distance qui sépare une cible d’un perturbateur est minime. IORDANESCU et al. (2009) utilisent dans leur étude un seuil de 3° de proximité pour identifier une zone critique. De plus, à cause du besoin d’abstraire ce qui se trouve autour d’une cible, deux cibles très proches l’une de l’autre peuvent interférer entre elles (SHIM et al., 2008). Afin de détailler les zones conflictuelles, la position du regard s’ajuste au cours du temps.

1.2.1.2 Activité du regard pendant le suivi visuel

Outre la fixation directe des cibles individuelles, la littérature rapporte une stratégie de fixation d'un point central aux cibles à suivre (FEHD & SEIFFERT, 2008 ; ZELINSKY & NEIDER, 2008 ; FEHD & SEIFFERT, 2010 ; OKSAMA & HYÖNÄ, 2016 ; HYÖNÄ et al., 2019). Ce point central réduit l'excentricité perçue des cibles en vision périphérique. Cependant, sa position exacte est difficile à prédire (OKSAMA & HYÖNÄ, 2016). Il a pu être identifié comme le centroïde des cibles (FEHD & SEIFFERT, 2008), ou comme une localisation rapprochée des zones encombrées de perturbateurs afin de réduire les interférences visuelles (LUKAVSKY, 2013 ; VATER et al., 2017a). Il est même proposé que ce point se porte finalement sur une cible ou sur son voisinage et que les autres cibles soient surveillées en périphérie (ZELINSKY & NEIDER, 2008 ; FEHD & SEIFFERT, 2010 ; OKSAMA & HYÖNÄ, 2016). Le terme *center-looking strategy* est employé dans la littérature relative au MOT pour décrire ce type d'activité (HYÖNÄ et al., 2019), mais elle s'apparente finalement à une stratégie d'ancrage du regard selon la littérature en sciences du sport (VATER et al., 2019).

Les données oculométriques révèlent aussi une alternance entre ce point central et les cibles individuelles. Ce point central sert de point de référence autour duquel de courtes saccades vers les cibles individuelles sont réalisées lorsque leur résolution en vision périphérique ne permet pas un traitement fiable (FEHD & SEIFFERT, 2010), lorsqu'elles sont sur le point d'être occultées (ZELINSKY & TODOR, 2010 ; KAMKAR et al., 2020), ou lorsqu'elles changent de direction après une collision (VATER et al., 2017a). Une nouvelle fois, le terme *center-target switching strategy* est utilisée dans la littérature en MOT (HYÖNÄ et al., 2019), mais elle correspond finalement au pivot visuel en sciences du sport (VATER et al., 2019).

Pour faire un nouveau parallèle à la littérature en sciences du sport, un changement de stratégie est rapporté avec une diminution du temps passé à fixer les cibles individuelles et du nombre de saccades en fonction de la vitesse de déplacement des objets (HUFF et al., 2010 ; OKSAMA & HYÖNÄ, 2016). L'inhibition visuelle liée aux saccades devient trop délétère face à des déplacements rapides. L'augmentation des contraintes spatio-temporelles invite à réduire l'utilisation d'un pivot visuel et à favoriser un ancrage du regard. Ensemble, ces résultats soulignent la capacité du test de suivi visuel à mimer en partie les contraintes d'attention visuelle pouvant être rencontrées sur le terrain.

1.2.2 Le suivi visuel en fonction de la pratique et de l’expertise sportive

Le nombre de cibles pouvant être correctement suivies est limité, et cette limite est également conditionnée par les caractéristiques individuelles de l’observateur. MEYERHOFF et PAPPENMEIER (2020) mettent en avant la capacité du test de suivi visuel à détecter des différences inter-individuelles d’attention visuelle. Les auteurs constatent une haute fidélité du test ($r=0.87$ et $ICC=0.86$), suite à deux mesures espacées de deux semaines sur un groupe d’étudiants. Ces différences inter-individuelles sont d’origines diverses.

1.2.2.1 Effet de l’âge

En forme de U inversé, la performance de suivi visuel évolue avec l’âge. Une performance croissante est observée chez des adolescents en fonction de leur âge (7–10, 11–13, 14–17, et 18–22 ans) dans l’étude de DYE et BAVELIER (2010). Une performance inférieure est observée chez des adultes âgés d’environ 75 ans par rapport à de jeunes adultes d’environ 21 ans dans l’étude de SEKULER et al. (2008). De plus, la trajectoire des capacités attentionnelles chez les adolescents semble s’accroître chez ceux et celles pratiquant régulièrement une activité avec de fortes demandes attentionnelles, comme les jeux vidéo (DYE & BAVELIER, 2010).

1.2.2.2 Effet de la pratique d’une activité exigeant de l’attention

GREEN et BAVELIER (2006) ont observé une performance de suivi visuel supérieure chez de jeunes adultes pratiquant des jeux vidéo d’action par rapport à des non-pratiquants de même âge. De plus, leurs résultats montrent une augmentation de la performance de suivi chez les non-pratiquants après une période d’entraînement sur un jeu vidéo d’action pendant 30h (réparties sur plusieurs semaines). Les auteurs soutiennent ainsi le lien de causalité entre la pratique régulière d’une activité aux fortes contraintes attentionnelles et le développement de compétences associées au suivi visuel (GREEN & BAVELIER, 2006).

L’effet de l’expérience sur la performance de suivi visuel est retrouvé dans d’autres domaines d’activité quotidienne comme chez les aiguilleurs du ciel (ALLEN et al., 2004) et les étudiants d’une école d’officiers (BARKER et al., 2010). En effet, dans le domaine du contrôle du trafic aérien comme dans celui de la défense et sécurité, un effort d’attention

visuelle est requis au quotidien.

1.2.2.3 Effet de la pratique et de l'expertise sportive

Dans le domaine du sport, TRICK et al. (2005) ont comparé la performance de suivi visuel des enfants pratiquant ou non des sports d'interaction (hockey sur gazon, football, ultimate, arts martiaux), et ont observé un effet marginal ($p=0.07$) en faveur du groupe des pratiquants. Dans cette lignée, d'autres recherches ont montré un avantage significatif chez des joueurs de sports collectifs confirmés par rapport à des non-pratiquants (X. ZHANG et al., 2009; MARTÍN et al., 2017; QIU et al., 2019; HARRIS et al., 2020b; JIN et al., 2020; JIN et al., 2022), ou un avantage essentiellement chez les joueurs élites par rapport à des joueurs réguliers (FAUBERT, 2013; MANGINE et al., 2014; QIU et al., 2018; Y. ZHANG et al., 2021). Le premier cas suggère que la simple pratique d'un sport collectif peut suffire à développer ses compétences attentionnelles tandis que le second suggère un développement accentué avec l'expertise.

Cependant, l'effet de la simple pratique n'est pas toujours vérifié. MEMMERT et al. (2009) n'ont pas observé de différences significatives entre des joueurs et joueuses de handball (plus de 10 ans de pratique) et des non-pratiquants. Une explication tiendrait au fait que la tâche n'était pas suffisamment difficile pour pouvoir distinguer des différences inter-individuelles (QIU et al., 2018; QIU et al., 2019; JIN et al., 2020). Les études de FAUBERT (2013) et QIU et al. (2018) ont trouvé une différence avec les joueurs élites, mais pas de différence entre des non-pratiquants et des pratiquants réguliers. Pour ces deux autres études, il est suggéré que le développement des capacités attentionnelles n'est pas linéaire avec la simple pratique, mais qu'il se produit à partir d'un certain niveau de pratique (QIU et al., 2018). Cependant, que ce soit par le non-renseignement ou la disparité dans le niveau de compétition des populations recrutées pour étudier l'effet de la pratique (MARTÍN et al., 2017; QIU et al., 2019; HARRIS et al., 2020b), il est encore difficile de distinguer l'effet de l'expertise de celui de la simple pratique (SWANN et al., 2015). Des protocoles longitudinaux ou avec des comparaisons inter-individuelles plus incrémentales sont nécessaires pour répondre à ces interrogations (WARD & WILLIAMS, 2003; FARROW et al., 2018; BEAVAN et al., 2019).

1.2.2.4 Autres facteurs individuels confondants

Il est également important de noter que la performance au football est multifactorielle. Une variabilité inter-individuelle dans un collectif de même niveau de compétition n’est pas surprenante puisqu’un déficit des qualités physiques peut être comblé en partie par des hautes compétences perceptivo-cognitives et inversement. Cette variabilité peut avoir un effet non-négligeable dans les conclusions tirées à partir des designs expérimentaux comparant des moyennes de groupe. Des facteurs confondants sont à prendre en considération comme le poste de jeu. MARTÍN et al. (2017) observent une performance de suivi visuel supérieure chez des arrières par rapport à des avants au rugby. Les auteurs supposent que ces différences sont liées aux demandes qui varient en fonction des postes de jeu. Un arrière au rugby semble plus régulièrement confronté au besoin de percevoir la disposition des partenaires et adversaires par rapport à un avant. Le genre des participants est autre facteur confondant (LEGAULT et al., 2022). JIN et al. (2022) observent des différences de performances de suivi visuel en faveur des hommes chez des non-pratiquants de sports collectifs. En revanche, les auteurs constatent que ces différences disparaissent avec la pratique régulière d’un sport collectif. Enfin, la performance de suivi visuel est altérée chez des individus disposant d’une déficience intellectuelle (VAN BIESEN et al., 2018), ou ayant subi une commotion (CHERMANN et al., 2018).

1.2.2.5 Activité du regard en fonction de l’expertise

Étant donné que la précision du suivi visuel dépend de l’activité du regard (FEHD & SEIFFERT, 2010), une activité plus appropriée est attendue chez les individus présentant les meilleures performances sur la tâche de suivi visuel, comme les joueurs de sports collectifs. Des activités d’exploration visuelle différentes sont recensées entre des joueurs de football en fonction de leur niveau de pratique sur des tâches de jugement spécifiques (voir section 1.1.2.2). Si la tâche de suivi visuel retranscrit bien les contraintes d’attention visuelle du terrain, alors des constats similaires sont attendus en comparant des individus en fonction de leur pratique sportive. Cependant, il existe très peu de données sur la relation entre la pratique sportive et l’activité du regard lors d’une tâche de suivi visuel.

Dans l’étude de HARRIS et al. (2020b), aucune différence dans l’activité du regard n’a été observée pendant une tâche de suivi visuel entre des joueurs de sports collectifs et des athlètes de sports individuels. Les auteurs soutiennent alors que la performance supérieure de suivi visuel des joueurs de sports collectifs reposait davantage sur les ca-

capacités perceptivo-cognitives fondamentales, à savoir la mémoire de travail, que sur un contrôle particulier du regard (HARRIS et al., 2020b). Cependant, dans leur procédure expérimentale, les participants ont suivi des objets qui se déplaçaient sur le plan frontal d'un écran 2D. On peut se demander si les contraintes de visualisation sont suffisamment similaires à celles du suivi de partenaires et d'adversaires sur le terrain pour permettre l'adoption de comportements naturels pour explorer la scène visuelle.

1.2.3 Transfert de l'entraînement du suivi visuel

Selon les différences inter-individuelles retrouvées en laboratoire, cette tâche de suivi visuel est supposée retranscrire certains aspects du football. Si les compétences mobilisées dans la tâche de suivi visuel chevauchent celles nécessaires à la performance au football, alors les bénéfices d'un entraînement basé sur le suivi visuel pourraient se répercuter favorablement sur la performance sportive (DAHLIN et al., 2008 ; ROMEAS et al., 2016).

1.2.3.1 Entraînabilité du suivi visuel

En ce qui concerne l'entraînement basé sur le suivi visuel, plusieurs investigations observent des améliorations sur la tâche entraînée (ROMEAS et al., 2016 ; MOEN et al., 2018 ; FLEDDERMANN et al., 2019 ; ROMEAS et al., 2019 ; HARRIS et al., 2020c ; HARENBERG et al., 2021 ; SCHARFEN & MEMMERT, 2021) et ce même chez des individus disposant de performances déjà élevées en début de protocole (FAUBERT, 2013 ; BENOIT et al., 2020). C'est généralement la version 3D-MOT du programme *Neurotracker* (Cognisens, Montréal, QC, Canada) qui est appliquée pendant 30 min environ dans un protocole pouvant varier entre 5 et 20 séances selon les études (FLEDDERMANN et al., 2019 ; HARRIS et al., 2020c ; HARENBERG et al., 2021 ; SCHARFEN & MEMMERT, 2021).

1.2.3.2 Transfert vers d'autres tests perceptivo-cognitifs

Le transfert décrit la capacité d'un programme d'entraînement à générer des améliorations sur d'autres tests. Par rapport à l'entraînement basé sur le suivi visuel, plusieurs niveaux de transfert ont été examinés (FLEDDERMANN et al., 2019 ; HARRIS et al., 2020c ; SCHARFEN & MEMMERT, 2021 ; VARTANIAN et al., 2021). Étonnamment, HARRIS et al. (2020c) n'ont pas recensé de transfert proche, *i.e.* vers une version similaire mais avec des différences par rapport à la tâche de suivi visuel utilisée en entraînement. L'amélioration constatée n'était pas statistiquement différente du simple fait de réitérer l'évaluation. Les

auteurs supposent que les caractéristiques de la tâche évaluée devaient finalement différer de la tâche entraînée de manière importante.

Cependant, HARRIS et al. (2020c) ont remarqué un transfert intermédiaire avec une amélioration de la performance du groupe entraîné sur un test de mémoire de travail (voir également, VARTANIAN et al., 2016 ; VARTANIAN et al., 2021 pour des résultats similaires) et aucun changement pour le groupe contrôle. LEGAULT et FAUBERT (2012) ont constaté un transfert avec une amélioration de la capacité à percevoir des mouvements biologiques chez des personnes âgées. FLEDDERMANN et al. (2019) ont rapporté un transfert avec une amélioration sur une tâche d’attention maintenue et une tâche de vitesse de traitement de l’information. Cependant, d’autres résultats sont plus mitigés sur le potentiel transfert vers des mesures des fonctions exécutives (MOEN et al., 2018 ; HARENBERG et al., 2021 ; SCHARFEN & MEMMERT, 2021).

1.2.3.3 Transfert vers le terrain

Enfin, des premiers résultats ont montré un transfert éloigné après un entraînement basé sur le suivi visuel, *i.e.* vers des tests spécifiques au domaine d’activité étudié, avec une amélioration de la prise de décision en passe au pied lors de jeux réduits (ROMEAS et al., 2016). En dépit de ces premiers résultats prometteurs, ce transfert éloigné n’est pas vérifié dans d’autres tests spécifiques au domaine militaire (HARRIS et al., 2020c ; VARTANIAN et al., 2021), au volleyball (FLEDDERMANN et al., 2019) et au football (HARENBERG et al., 2021). La capacité de ce type d’entraînement à retranscrire l’ensemble des caractéristiques de la tâche sportive nécessaires pour espérer des améliorations de la performance sportive finale est discutée (HADLOW et al., 2018). Cependant, il est tout à fait possible que des bénéfices soient transférés sur d’autres aspects que ceux testés en laboratoire (FLEDDERMANN et al., 2019). ROMEAS et al. (2016) ont utilisé une analyse par notation sur du jeu réduit comme mesure de transfert tandis que HARENBERG et al. (2021) ont utilisé une tâche perceptivo-motrice de prise de décision face à une vidéo de situations pré-construites. Des études complémentaires avec une nouvelle batterie de tests pourraient aider à déterminer sur quelle dimension de la performance un entraînement basé sur le suivi visuel peut avoir un intérêt. De plus, d’autres modalités d’entraînement (fréquence des séances, durée du programme, format de présentation, ...) devraient être considérées afin de voir si le transfert ne se produit qu’à partir d’une certaine *dose* d’entraînement (HARRIS et al., 2020c). Enfin, la complexité de l’activité perceptivo-cognitive dans les

sports collectifs milite pour combiner la tâche de suivi visuel avec d'autres contraintes du terrain, comme la double-tâche (ROMEAS et al., 2019; SCHARFEN & MEMMERT, 2019), pour espérer observer des bénéfices sur la performance sportive finale.

Résumé

La tâche de suivi visuel est traditionnellement employée pour tester la relation entre expertise sportive et attention visuelle, mais aussi pour composer des programmes d'entraînement perceptivo-cognitif hors du terrain. Elle est appliquée car elle est supposée restituer plusieurs aspects de la vie réelle. Cependant, la représentativité de cette tâche peut se discuter (MEYERHOFF et al., 2017). En effet, surveiller des sphères se déplaçant aléatoirement sur un plan frontal ne semble retranscrire qu'une part limitée des contraintes attentionnelles du football, ce qui pourrait expliquer en partie certains résultats n'observant pas de différence entre des pratiquants et des non-pratiquants (MEMMERT et al., 2009), ou ceux ne rapportant pas de transfert d'un entraînement basé sur le suivi visuel vers des tests spécifiques au football (ROMEAS et al., 2016; HARENBERG et al., 2021). Les différences inter-individuelles mesurées dans la tâche de suivi visuel pourraient finalement minimiser celles existant en matière de capacité à dynamiquement allouer son attention pour jouer au football. Or, l'intérêt d'un test est de pouvoir capturer sensiblement les différences inter- et intra-individuelles. Dans cette perspective, les environnements virtuels, et plus particulièrement les technologies immersives de réalité virtuelle, offrent la possibilité de contextualiser les tâches d'évaluation tout en maintenant un haut niveau de standardisation.

1.3 Évaluation contextualisée au football : application de la réalité virtuelle

Dans l’approche spécifique, van MAARSEVEEN et al. (2018) n’ont noté aucune association significative entre la performance mesurée en jeu réduit et celle mesurée sur des tests d’anticipation, de prise de décision et de *pattern recognition* en laboratoire chez des joueurs de football. Dans l’approche générique, MEMMERT et al. (2009) ne constatent pas de différence entre des joueurs de handball et des non-pratiquants sur plusieurs tâches attentionnelles. Ce ne sont que deux exemples, mais le décalage entre les conditions d’évaluation et les contraintes de performance dans le sport étudié est à chaque fois discuté comme un possible facteur limitant l’expression de l’expertise.

La validité construite décrit la capacité d’un test à sensiblement discriminer des variations inter-individuelles. Elle semble conditionnée par la validité écologique du test, elle-même décrite comme la correspondance entre les contraintes d’évaluation et celles du terrain. Avec une faible validité écologique, les compétences sollicitées dans l’évaluation pourraient différer de celles réellement exigées dans la pratique. Dans ce cas, il est peu probable qu’un expert puisse démontrer son avantage sur d’autres pratiquants (PINDER et al., 2011).

Pour remédier à cette difficulté, plusieurs facteurs sont à considérer pour accentuer la représentativité d’une tâche d’évaluation ou d’entraînement (TRAVASSOS et al., 2013 ; BROADBENT et al., 2015 ; HADLOW et al., 2018 ; KALÉN et al., 2021). À l’ère du numérique, de nouveaux supports technologiques, dont la Réalité Virtuelle (RV), facilitent la contextualisation d’une tâche à un domaine de la vie réelle. Cette dernière partie de l’état de l’art décrit différents facteurs de contextualisation retrouvés dans la littérature. Elle décrit également comment les environnements virtuels, et plus particulièrement la RV, peuvent répondre à ce besoin. Elle s’appuie sur les données de la littérature illustrant l’évaluation perceptivo-cognitive des joueurs de football en RV.

1.3.1 Contextualisation de l’évaluation en laboratoire

Pour contextualiser une évaluation à un domaine sportif, 4 facteurs sont principalement retrouvés dans la littérature (liste non-exhaustive) : la compétence ciblée, les conditions de visualisation, la modalité de réponse et les contraintes multitâches (Fig. 1.6).

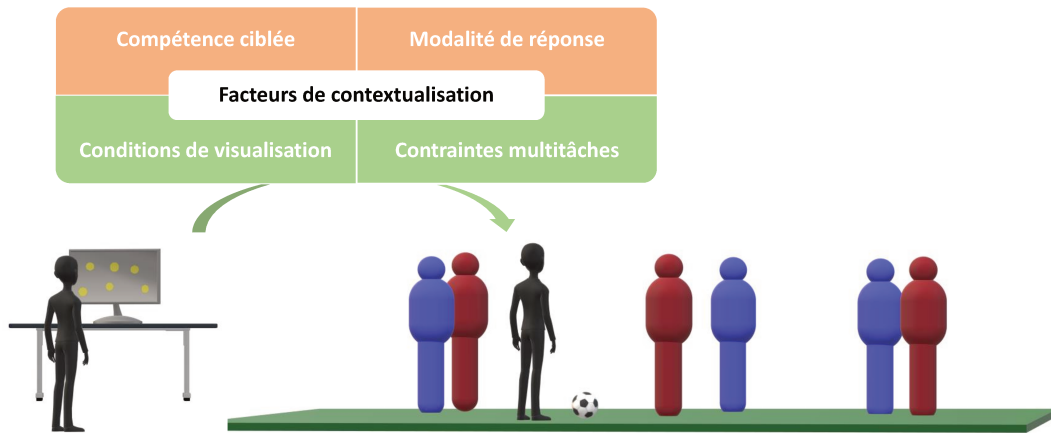


FIGURE 1.6 – Schéma d’une démarche de contextualisation de la tâche de suivi visuel générique (à gauche) à une version contextualisée au football (à droite). Deux facteurs sont considérés dans cette illustration. 1) Adaptation des conditions de visualisation en passant d’un plan frontal sur écran à une répartition à 180° des objets mobiles dans un environnement 3D sur un plan horizontal. 2) Ajout des contraintes multitâches en interagissant avec le ballon pendant le suivi visuel.

1.3.1.1 Compétence perceptivo-cognitive ciblée

Sur un continuum allant de la fonction la plus générique (*e.g.* l’acuité visuelle) à la compétence la plus spécifique (*e.g.* la prise de décision), la tâche de suivi visuel peut se retrouver au milieu de ces extremums (HADLOW et al., 2018). Cette tâche implique une allocation dynamique et flexible de l’attention visuelle entre plusieurs éléments mobiles. De la même manière sur le terrain, l’attention est attribuée dynamiquement entre les partenaires et adversaires au cours d’une situation de jeu. Cependant, la réussite dans la tâche implique d’accentuer la perception de certains éléments et d’abstraire les autres, ce qui n’est pas le cas en situation de match. De plus, les cibles à suivre restent les mêmes tout au long d’un essai, à l’inverse de ce qui se passe sur le terrain où les sources d’intérêt vers lesquelles allouer son attention changent au fur et à mesure d’une situation de jeu. Enfin, la tâche de suivi visuel n’inclut pas de prise de décision ou une action réinvestissant les informations collectées. Des alternatives interactives du MOT, destinées à coupler le suivi visuel à une réponse motrice, sont possibles et seront discutées dans les perspectives de ce travail (voir la section 6.6.1 dans la Discussion générale).

1.3.1.2 Conditions de visualisation

La représentativité des stimuli visuels dépend de leur type (des points/des lettres vs. une scène sportive), de leur comportement (mouvements réalistes vs. aléatoires), et du médium de diffusion (image vs. vidéo). Dans l’approche spécifique de la performance experte, les stimuli présentés sont hautement représentatifs puisqu’ils sont issus de situations réelles (VAEYENS et al., 2007b; NORTH et al., 2016). Même si le contenu est spécifique, les caractéristiques de diffusion peuvent varier et influencer les résultats. Par exemple, le point de vue utilisé pour filmer et rediffuser les situations par vidéo pouvait se trouver directement sur le terrain (*e.g.* VAEYENS et al., 2007a), ou à une position surélevée et reculée derrière le but (*e.g.* BELLING et al., 2015). MANN et al. (2009) ont comparé l’activité du regard dans une tâche de prise de décision face à des situations filmées à partir de ces deux points de vue. Des variations sont constatées aussi bien dans l’activité du regard que dans la performance réalisée dans la tâche. Bien que la vue surélevée et reculée permet d’utiliser des situations réelles de match, le point de vue du terrain restitue plus fidèlement les indices accessibles en temps réel selon un poste de jeu (WILLIAMS et al., 2008). Une limite liée aux vidéos est la restitution partielle des informations disponibles sur le terrain (HODGES et al., 2007; DICKS et al., 2010). Même si certaines procédures expérimentales tentent de recréer des conditions réalistes avec une diffusion « grandeur nature » (ROCA et al., 2011), le point de vue est fixe, le stimulus est délivré sur un plan frontal 2D sans indication de profondeur et l’angle de vision est réduit par rapport aux conditions réelles de visualisation. Ces altérations se répercutent sur les comportements d’exploration visuelle et les performances mesurées en laboratoire (DICKS et al., 2009).

À l’origine de l’approche générique, les stimuli et les conditions de visualisation étaient complètement décorrélés de tout domaine de la vie réelle (VOSS et al., 2010). Cependant, le besoin de contextualisation au domaine d’expertise étudié est aujourd’hui également reconnu (*e.g.* HÜTTERMANN et al., 2019a; KLATT et SMEETON, 2020; HEILMANN et al., 2021; MUSCULUS et al., 2022). Rappelons que lors de la tâche de suivi visuel, les conditions standards de visualisation impliquent de surveiller des disques ou des sphères se déplaçant aléatoirement sur le plan frontal d’un écran 2D en position assise (Fig. 1.5). Pour se rapprocher des conditions d’un sport collectif, une version 180° (BEAVAN et al., 2020a; BEAVAN et al., 2020b; BEAVAN et al., 2022) et une version 360° (EHMANN et al., 2021; EHMANN et al., 2022a; EHMANN et al., 2022b) demandent de suivre des avatars humanoïdes qui courent dans un environnement virtuel 3D projeté sur un écran incurvé

entourant l'observateur partiellement (MOT-180°) ou complètement (MOT-360° : voir figure 1.7). Les participants se tiennent debout et peuvent se déplacer pour réaliser la tâche de suivi visuel (Fig. 1.8). Une fiabilité correcte du MOT-360° a été vérifiée (ICC = 0.71) entre deux sessions de mesure séparées de 6 semaines (EHMANN et al., 2021).

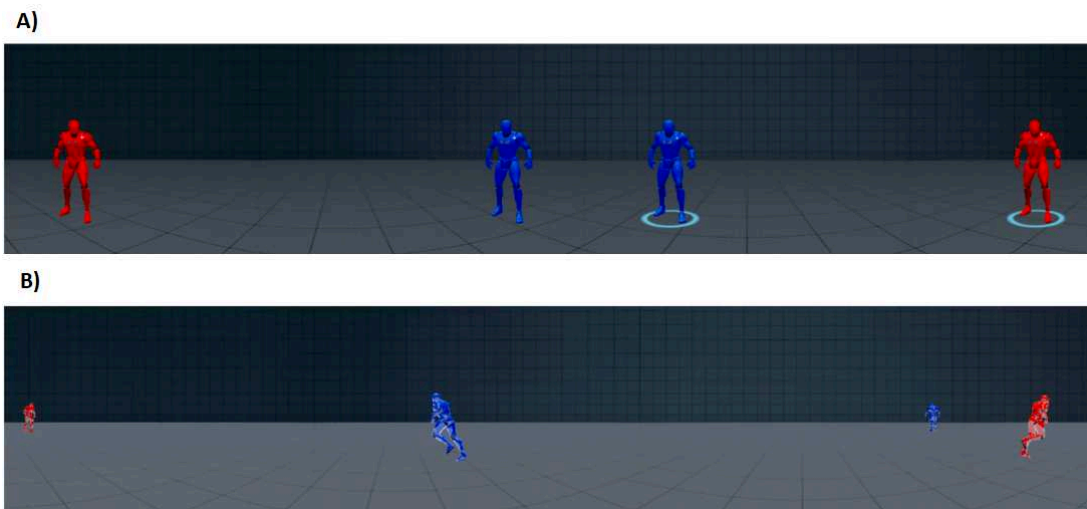


FIGURE 1.7 – **Présentation des stimuli utilisés dans la version MOT-360° de l'étude Ehmman et al. (2021).** A) Les objets virtuels sont des avatars humanoïdes de deux couleurs différentes et les cibles sont les avatars indiqués par un cercle au sol. B) Dans la phase de suivi, les avatars courent dans une direction aléatoire avant de revenir se placer en face du participant (les positions initiales et finales sont différentes).

Chez des joueurs de football adolescents, une performance supérieure sur la tâche de MOT-360° est observée chez des joueurs élites par rapport à des joueurs sous-élites (EHMANN et al., 2022a). De plus, une corrélation modérée ($r=0.35$) mais tout de même significative est constatée entre la performance mesurée sur la version MOT-360° et la performance des défenseurs évaluée sur du jeu réduit (EHMANN et al., 2022b). Ensemble, ces résultats soutiennent la capacité du test à retranscrire certains aspects du football. Cependant, cette interprétation est contrastée par d'autres résultats. En suivant de jeunes joueurs et joueuses de football sur plusieurs saisons, il est observé que l'évolution liée à l'âge sur du MOT-360° ou MOT-180° suit l'évolution de la population générale (BEAVAN et al., 2020a; BEAVAN et al., 2020b; BEAVAN et al., 2022). D'une part, cela montre que l'accès à la performance reste possible sans pour autant disposer de capacités attentionnelles supérieures à la moyenne (BEAVAN et al., 2022). D'autre part, les auteurs supposent que la tâche de suivi visuel ne retranscrit pas encore suffisamment l'activité pour être pertinente dans l'évaluation de la performance sportive (BEAVAN et al., 2020a).



FIGURE 1.8 – **Présentation de l’écran incurvé dans la tâche de MOT-180°** (Chin et al., 2021).

De plus, aucun transfert sur du jeu réduit n’est constaté dans un groupe de joueurs ayant suivi un entraînement basé sur le MOT-360° pendant 5 semaines à raison de 2 séances par semaine (EHMANN et al., 2022b). Malgré l’effort fourni pour se rapprocher des contraintes du terrain, de nouvelles adaptations sont à considérer comme l’utilisation de déplacements rationnels (et non pas aléatoires) pour animer les objets virtuels (HADLOW et al., 2018; EHMANN et al., 2022b).

1.3.1.3 Modalité de réponse

La méthode de diffusion des stimuli n’influence pas que les conditions de visualisation, mais également les possibilités de réponse (DICKS et al., 2009; HEILMANN et al., 2021). Pour anticiper un tir de penalty face à une vidéo ou en situation réelle, les résultats de DICKS et al. (2010) montrent que l’exploration visuelle varie en fonction de la modalité de réponse (verbale, à l’écrit, simulée ou exécution réelle de l’interception). Or la vision ne sert pas qu’à percevoir son environnement et ses changements, mais également à contrôler l’action. De plus, le paradigme d’occultation temporelle restreint le moment de réponse à la fenêtre suivant l’arrêt de la vidéo pour standardiser la quantité d’informations accessibles. En revanche, il est probable qu’en conditions réelles, les experts saisissent l’opportunité d’agir avant même le moment correspondant à l’arrêt de la vidéo (HELSEN & STARKES, 1999). De nouvelles procédures sortent de ce paradigme et laissent

l'opportunité de répondre par l'action avec un vrai ballon au pied à différents moments d'une vidéo d'une situation de jeu filmée selon le point de vue du porteur de balle (MURR et al., 2021).

Cependant, les procédures de réponse sont également conditionnées par la compétence mesurée. Par exemple, pour une tâche de *pattern recognition*, impliquant d'affirmer ou non si une situation présentée en vidéo a préalablement déjà été visionnée, les moyens de réponse sont forcément dissociés des actions spécifiques au football (van MAARSEVEEN et al., 2018). Par rapport à la tâche de suivi visuel, la marge de manœuvre pour contextualiser les modalités de réponse est également limitée. Cet aspect est discuté dans les perspectives de ce travail (section 6.6.1).

1.3.1.4 Contraintes multitâches

Un joueur n'est pas simplement spectateur, mais il doit percevoir ses partenaires, ses adversaires et le ballon pendant que lui-même se déplace et interagit avec l'environnement. Or, toute activité motrice, aussi maîtrisée soit-elle (comme le maintien de la station debout ou la locomotion) requiert un minimum de contrôle attentionnel (WOOLLACOTT & SHUMWAY-COOK, 2002; AL-YAHYA et al., 2011). Dans une approche théorique basée sur le partage de ressources attentionnelles, les ressources mobilisées dans une tâche ne sont plus disponibles pour résoudre une autre tâche se produisant en même temps (KAHNEMAN, 1973; PASHLER, 1994; WICKENS, 2002). Ainsi, la double-tâche, *i.e.* la réalisation simultanée de deux tâches concurrentes mobilisant des ressources communes, induit une interférence entre les deux tâches (HUANG & MERCER, 2001; KOCH et al., 2018). L'interférence se traduit par l'incapacité de maintenir le niveau de performance sur une tâche par rapport à son exécution de manière isolée. L'illustration typique est l'utilisation du téléphone au volant qui dégrade significativement la vigilance aux signaux visuels nécessaires à la conduite (STRAYER & JOHNSTON, 2001). De plus, l'interférence entre deux tâches sera accentuée si la même voie d'entrée est mobilisée (WICKENS, 2002). Ainsi au football, une difficulté est liée à l'utilisation du système visuel pour percevoir les autres joueurs, se déplacer et interagir avec le ballon.

Dans le domaine du sport, c'est essentiellement l'influence de la performance sportive sur l'interférence cognitivo-motrice qui est examinée, *i.e.* l'influence d'une tâche perceptivo-cognitive sur l'exécution d'une compétence motrice et inversement (SCHAEFER, 2014). La littérature montre une meilleure conservation de performance de putting au golf

(BEILOCK et al., 2002b), de frappe à la batte au baseball (GRAY, 2004) ou de dribble au football (BEILOCK et al., 2002a) pendant la réalisation d’une tâche de reconnaissance de signaux sonores chez des athlètes expérimentés par rapport à des athlètes novices. En ce qui concerne la prise de décision dans les sports collectifs, GABBETT et al. (2011) ont comparé la performance dans une tâche offensive de 2 contre 1 réalisée sur le terrain de manière isolée (condition simple-tâche) ou pendant la reconnaissance de signaux sonores (condition double-tâche) chez des joueurs de rugby élites et des joueurs réguliers. La différence entre les groupes n’est significative que dans la condition double-tâche en faveur des joueurs élites. La capacité des experts à mieux résister à l’interférence de la double-tâche pourrait être expliquée par l’automatisation avec l’apprentissage de la compétence évaluée (ABERNETHY et al., 2007). Les demandes attentionnelles liées à la tâche de 2 contre 1 pourraient ainsi être réduites chez les joueurs élites par rapport aux joueurs confirmés, leur laissant la possibilité d’accomplir cette tâche sans dégradation de la performance pendant la reconnaissance de signaux sonores (GABBETT et al., 2011). Les auteurs soulignent la pertinence de la condition double-tâche pour faciliter la discrimination des différences de performance en fonction du niveau de compétition chez des joueurs de rugby. Dans une étude suivante, une association modérée ($r^2=0.44$) mais significative est observée entre la performance mesurée sur une double-tâche de 2 contre 1 réalisée en test et la performance en 2 contre 1 amenant un essai en matchs réels lors de la saison suivante (GABBETT & ABERNETHY, 2012). Ainsi, la double-tâche semble être une procédure intéressante pour évaluer la capacité des joueurs de sports collectifs à gérer les demandes simultanées de plusieurs activités en situation de match (GABBETT et al., 2011 ; GABBETT & ABERNETHY, 2012).

Par rapport au suivi visuel, des investigations se sont également intéressées à l’influence de la double-tâche (LOCHNER & TRICK, 2014 ; POTHIER et al., 2015 ; VATER et al., 2017b ; VAN BIESEN et al., 2018 ; ROMEAS et al., 2019 ; ZWIERKO et al., 2022). Pour retranscrire les demandes attentionnelles liées à la perception d’obstacles dans un environnement encombré comme une foule de piétons à un croisement de rues, POTHIER et al. (2015) ont évalué le suivi visuel de jeunes adultes et de seniors pendant la marche. Une interférence (marquée par une réduction de la vitesse de marche) significativement plus importante est observée chez les seniors par rapport aux jeunes adultes dans la condition double-tâche. Etant donné que l’écart entre les groupes d’individus est plus important dans la condition double-tâche, les auteurs soulignent la pertinence de la double-tâche pour étudier l’influence liée à l’âge du déclin d’attention visuelle sur la vie quotidienne

(POTHIER et al., 2015). Dans le domaine sportif, ROMEAS et al. (2019) observent une interférence sur la performance de suivi visuel liée à la réalisation d'une seconde tâche d'interception d'un volant chez des joueurs de badminton ou de perception de mouvements biologiques chez des non-sportifs. Les auteurs montrent que cette interférence peut se réduire à la suite d'un entraînement basé sur le suivi visuel, et potentiellement davantage dans des modalités d'entraînement double-tâche. Dans le cas du football également, la double-tâche pourrait être une procédure intéressante pour favoriser la représentativité des contraintes d'entraînement (SCHARFEN & MEMMERT, 2021). Reste à savoir de quelle manière les bénéfices d'un entraînement de ce type peuvent se transférer à la pratique sportive finale. De leur côté, VAN BIESEN et al. (2018) ont comparé la performance de suivi visuel pendant une tâche d'équilibre chez des athlètes, provenant de diverses activités sportives, présentant ou non une déficience intellectuelle. Une interférence plus importante liée à la double-tâche est observée chez les athlètes présentant une déficience intellectuelle. Là encore, la pertinence de la double-tâche pour observer l'influence d'une déficience intellectuelle sur la performance sportive des athlètes est mise en avant (VAN BIESEN et al., 2018). Cependant, davantage de preuves sont nécessaires afin de vérifier la pertinence de la double-tâche pour étudier l'effet de l'expertise sur la performance de suivi visuel des joueurs de sports collectifs.

1.3.2 Réalité virtuelle et performance au football

Pour contextualiser l'évaluation de l'attention visuelle à la conduite automobile, LOCHNER et TRICK (2014) ont proposé une version *multiple-vehicle-tracking* impliquant le suivi de voitures à bord d'un simulateur virtuel. À partir d'une version du MOT-360° délivrée en réalité virtuelle, KRUPITZER et al. (2022) ont observé une motivation et un engagement plus élevés chez des joueurs de football par rapport à l'utilisation des supports monoscopiques. Ces deux exemples illustrent les possibilités offertes par l'exploitation des environnements virtuels, et plus particulièrement la RV, pour contextualiser l'évaluation de l'attention visuelle au football. Cependant, aussi attrayante puisse être cette technologie pour l'industrie, son intérêt doit être validé en laboratoire avant de pouvoir être déployé dans les clubs (BEAVAN, 2019).

Les technologies immersives de RV sont apparues dans les années 70 (SUTHERLAND, 1968). La figure 1.9 présente l'un des premiers dispositifs de *Head-Mounted-Display* (HMD). La RV permet d'analyser de manière standardisée la prise d'information dans des domaines

où les mesures *in situ* sont compliquées, comme la navigation piétonne (BERTON et al., 2019; BERTON et al., 2020), la conduite de voiture (TURNBULL et al., 2021), la chirurgie médicale (VINE et al., 2014) ou encore la défense et la sécurité (LELE, 2013). Ces technologies présentent également un grand intérêt dans le développement de la performance sportive (LIEBERMANN et al., 2002; BIDEAU et al., 2009; MILES et al., 2012; CRAIG, 2013; NEUMANN et al., 2018; AKBAŞ et al., 2019; GRAY, 2019; MICHALSKI et al., 2019; FAURE et al., 2020; XIE et al., 2021; LE NOURY et al., 2022; LIMBALLE et al., 2022; MÜLLER et al., 2022; RICHLAN et al., 2022). Cependant de nouvelles preuves scientifiques sont requises afin de déterminer les conditions nécessaires pour qu’un outil basé sur la réalité virtuelle puisse être pertinent pour la performance sportive (DÜKING et al., 2018).

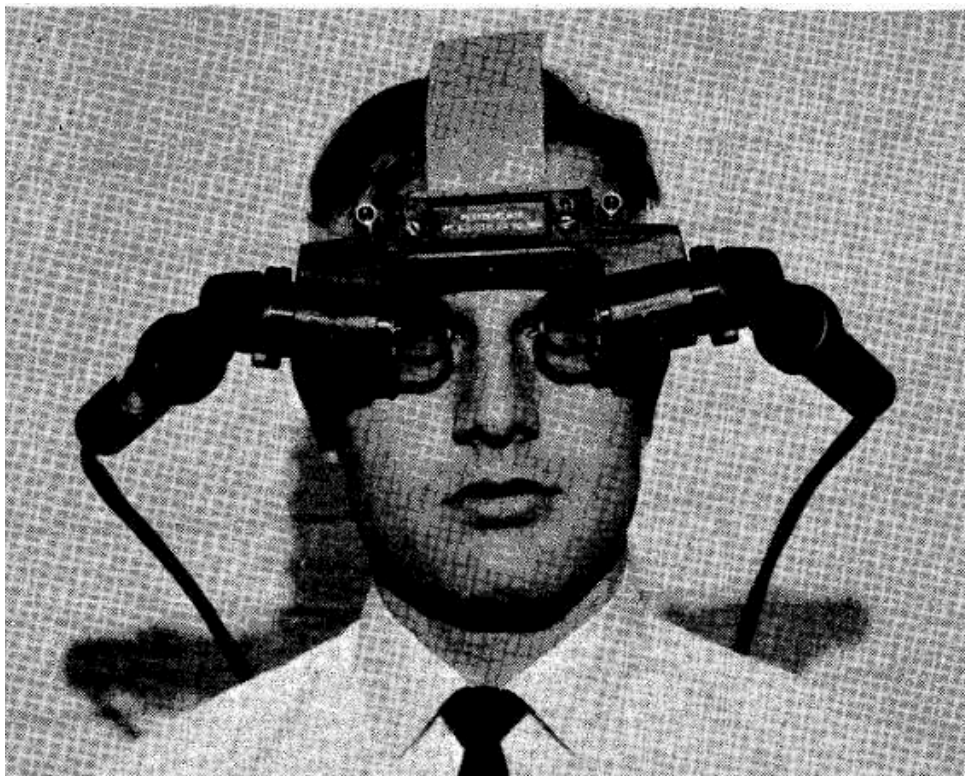


FIGURE 1.9 – Présentation d’un des premiers prototypes de HMD issu des travaux de Sutherland (1968). Finalement, ce dispositif est décrit aujourd’hui comme un système de réalité augmentée, *i.e.* permettant « l’augmentation des stimuli visuels naturels avec des indices simulés numériquement » (MILGRAM et al., 1995).

1.3.2.1 Immersion et présence

Le terme réalité virtuelle englobe d'une part le médium de diffusion et d'autre part l'expérience vécue par l'utilisateur (STEUER, 1992 ; SLATER, 2009). Le HMD et le *Cave Automatic Virtual Environment* (CAVE) sont les deux principaux médiums utilisés pour délivrer la projection stéréoscopique d'un monde virtuel en 3 dimensions généré informatiquement et qui s'adapte aux mouvements de l'utilisateur en temps réel (LOOMIS et al., 1999).

Le CAVE est composé de plusieurs murs et d'un sol de projection encadrant un espace dans lequel l'utilisateur est libre de se déplacer et d'agir. Le port de lunettes stéréoscopiques assure la perception des éléments virtuels dans l'espace 3D (LOOMIS et al., 1999). De plus, ce dispositif laisse la possibilité de visualiser son propre corps pendant la simulation, ce qui facilite les interactions avec les objets virtuels (PETRI et al., 2018). Cependant, son utilisation est complexe et l'investissement financier reste très important.

Le HMD est un casque disposant d'un ou deux écrans placé(s) juste devant les yeux de l'utilisateur pour délivrer une image stéréoscopique de l'environnement virtuel 3D grâce à un système de lentilles optiques. Cette solution plus mobile, légère et financièrement accessible se démocratise plus facilement auprès du grand public (BIRD, 2020). Un HMD a l'avantage de donner accès à l'environnement virtuel à 360°. Cependant, le HMD comporte un champ visuel réduit (*e.g.* 110° pour un HTC Vive TM 1), à l'exception de certains modèles (*e.g.* le Pimax 8K X TM est moins limité sur l'axe horizontal²). De plus, la présence de l'écran opaque isole entièrement l'utilisateur de l'environnement réel, ce qui rend impossible l'accès direct aux informations sur son corps dans l'espace. Des stratégies de co-localisation du corps réel de l'utilisateur dans le monde virtuel doivent ainsi être mises en oeuvre via l'utilisation de capteurs (PASTEL et al., 2020). D'autres dispositifs peuvent être ajoutés comme une manette pour interagir avec les objets virtuels, ou des dispositifs de restitution sonore et haptique. La qualité et la complémentarité des matériels utilisés vont conditionner le degré d'immersion du système, *i.e.* « sa capacité technique à restituer une illusion de la réalité » (SLATER & WILBUR, 1997).

L'immersion est une caractéristique nécessaire pour générer un sentiment de *présence* chez l'utilisateur, *i.e.* « l'expérience psychologique d'être au sein de l'environnement vir-

1. <https://www.vive.com/fr/product/vive-pro/>

2. <https://pimax.com/fr/pimax-8k-x/>

tuel » (SLATER, 2009 ; CUMMINGS & BAIENSON, 2016). En délivrant une expérience plausible, un individu pourra éprouver des émotions naturelles et agir au sein de l’environnement virtuel de la même manière qu’en réel (SLATER, 2009). Cela s’illustre par exemple à l’apparition du vertige à l’approche d’un ravin virtuel (SLATER, 2009). Ce sentiment de présence sera renforcé en fonction de la congruence des afférences sensorielles pouvant être ajoutées (GULEC et al., 2019 ; BOUZBIB et al., 2021). Par exemple, GULEC et al. (2019) ont remarqué chez des arbitres de football visionnant des situations de jeu en RV un sentiment de présence plus élevé lorsque le stade virtuel était rempli de spectateurs virtuels faisant plus de bruit.

1.3.2.2 **Avantage de la RV sur la vidéo dans la performance sportive**

La vidéo délivre l’affichage d’une situation de jeu avec un haut niveau de réalisme. Cependant, la dimension de l’écran de projection ne recouvre généralement qu’une partie réduite du champ de vision. Bien que cette limite puisse être levée avec les vidéos 360° délivrées dans un HMD (WIRTH et al., 2018 ; KITTEL et al., 2020 ; FORTES et al., 2021), ces dispositifs ne permettent toujours pas la restitution d’un point de vue adaptatif ni l’accès aux indices de profondeur (VIGNAIS et al., 2015). Or, un joueur perçoit activement son entourage en se décalant, en pivotant des yeux, sa tête et son corps pour regarder dans n’importe quelle direction tout en se déplaçant et en interagissant avec l’environnement (SLATER & SANCHEZ-VIVES, 2016 ; MCGUCKIAN et al., 2018b). Comparée à la vidéo, la RV basée sur des images synthétiques à l’avantage de procurer un point de vue adaptatif modifiant la forme des objets 3D projetés en stéréoscopie selon le point de vue de l’utilisateur (SLATER & SANCHEZ-VIVES, 2016). Ce degré d’immersion permet à l’observateur d’adopter des comportements d’exploration visuelle naturels pour percevoir activement l’environnement virtuel (CRAIG, 2013 ; GIBSON, 2014). Même si les images synthétiques délivrées ont un moindre niveau de réalisme par rapport aux vidéos, les utilisateurs parviennent à s’en accommoder et à comprendre quelle scène est simulée (SLATER & SANCHEZ-VIVES, 2016). Malgré une utilisation encore régulière de la vidéo pour étudier la performance perceptivo-cognitive des sportifs (*e.g.* écran plat 2D : MURR et al., 2021 ; ROCA et al., 2021 ou 360° : KITTEL et al., 2019), la RV offre un support technologique plus pertinent pour étudier la perception visuelle impliquée dans la performance des joueurs de sports collectifs (BIDEAU et al., 2009 ; VIGNAIS et al., 2015).

1.3.2.3 Activité d’exploration visuelle en RV

Dans le cas des activités nécessitant une exploration visuelle effective pour décider et agir, la validité construite d’un simulateur dépend de sa *fidélité psychologique*, *i.e.* sa capacité à permettre l’adoption de comportements d’exploration visuelle naturels (VINE et al., 2014; GRAY, 2019; HARRIS et al., 2020a). À partir des capteurs internes à un HMD, il est possible d’enregistrer les mouvements de tête au cours du temps (MCGUCKIAN et al., 2018b), ainsi que l’activité du regard sur certains modèles disposant d’un oculomètre intégré (*e.g.* le HTC Vive Pro Eye avec un oculomètre Tobii³). Ce support matériel représente une voie intéressante pour mener des études sur les comportements d’exploration visuelle qui sous-tendent la performance sportive (HARRIS et al., 2022; PASTEL et al., 2022). Cependant, la création synthétique de la dimension de profondeur implique l’altération de fonctions visuelles, comme l’accommodation (HARRIS et al., 2022). Ces différences entre les afférences visuelles issues du monde réel et du monde virtuel peuvent induire une sous-estimation des distances perçues en RV (EL JAMIY & MARSH, 2019). Même si ces altérations semblent se réduire avec l’amélioration du rendu liée aux nouveaux matériels (PASTEL et al., 2021), elles peuvent générer des différences dans l’activité du regard réalisé en RV par rapport à celle menée dans le monde réel (HARRIS et al., 2022).

En dépit de quelques différences quantitatives, des comportements du regard similaires sont observés lors de la navigation et de l’évitement de collision chez des piétons en réel et en RV (BERTON et al., 2019; BERTON et al., 2020). Ce qui est encourageant vis-à-vis de la pertinence de l’analyse du regard dans des conditions standardisées en RV. Ce type de comparaison doit à l’avenir être mené également dans le contexte du football. La fidélité psychologique d’un simulateur de situations de jeu au football en RV pourrait être évaluée en comparant l’activité du regard menée en RV avec l’activité collectée via un oculomètre mobile lors de situations réelles de jeu (*e.g.* AKSUM et al., 2021).

Sans toutefois disposer d’enregistrement de la direction du regard, l’activité d’exploration visuelle dans une tâche de prise de décision spécifique en RV a été analysée à partir des mouvements de corps et de tête chez des joueurs de football réguliers et des pratiquants occasionnels dans l’étude de ROJAS FERRER et al. (2020). Les auteurs relèvent une zone de balayage plus large avant de réaliser une passe de la part des joueurs réguliers par rapport aux pratiquants occasionnels. Cependant, un biais lié à la modalité de réponse a pu influencer les données collectées sur l’activité d’exploration visuelle. La

3. <https://www.vive.com/us/product/vive-pro-eye/specs/>

tâche de prise de décision exigeait l’exécution d’un mouvement de passe capté par une caméra de profondeur (Microsoft Kinect[™]). Face à la complexité de modéliser fidèlement une interaction plausible avec un ballon virtuel, la direction de la passe correspondait à la direction du HMD dans l’environnement virtuel. Ce mode d’interaction impliquait de fixer l’orientation de la tête en direction du joueur vers lequel la passe était adressée, ce qui n’est pas nécessairement le cas dans un match réel. À l’avenir, de nouvelles modalités d’interaction doivent être testées pour permettre l’adoption de comportements d’exploration les plus naturels possibles.

1.3.2.4 Évaluation de l’expertise sportive en RV

Si un environnement virtuel immersif est en mesure de générer des comportements naturels, alors les différences inter-individuelles observables dans le monde réel sont supposées être retranscrites dans les simulations en laboratoire (DESSING & CRAIG, 2010; HARRIS et al., 2021a; WOOD et al., 2021). La validité construite d’un simulateur en RV peut ainsi être attestée en comparant la performance des individus en fonction de leur niveau d’expertise dans le domaine étudié (HARRIS et al., 2020a). Par exemple, HARRIS et al. (2021a) ont comparé la performance de golfeurs élites et novices sur une tâche de putting dans le monde réel et en RV. Une performance supérieure est rencontrée chez les golfeurs élites dans les deux environnements et une corrélation modérée ($r=0.46$) sur la performance réalisée est observée entre les deux environnements. Les auteurs soutiennent ainsi la pertinence de leur environnement en RV pour retranscrire les conditions de réalisation du monde réel et étudier la performance au golf.

WOOD et al. (2021) ont comparé des joueurs de football professionnels, de jeunes joueurs en centre d’entraînement et des joueurs novices dans une batterie de tests perceptivo-moteurs en RV présentés dans la figure 1.10. Sur un score global incluant l’ensemble des tests⁴, une performance supérieure est observée chez les professionnels par rapport aux jeunes joueurs académiques qui ont eux-mêmes surpassés les joueurs novices. Cependant, chaque test pris séparément ne fournissait pas systématiquement des résultats équivalents. Aucune différence significative entre les sujets n’est ainsi rapportée sur l’exercice nommé « color combo » (Fig. 1.10-b). Les auteurs argumentent que les mécanismes mobilisés dans cet exercice sont probablement moins représentatifs de la performance au football que ceux des autres tests qui requièrent une passe suite à la perception de l’environnement

4. voir les détails sur le site de l’application <https://rezzil.com/rezzil-index/>

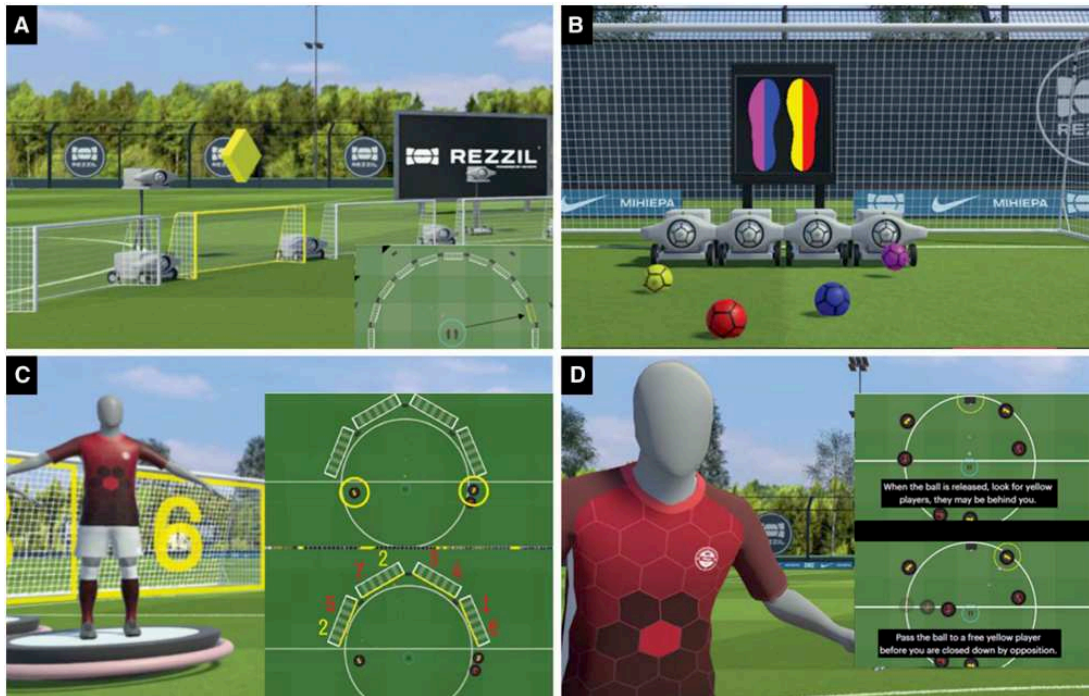


FIGURE 1.10 – Présentation des 4 exercices utilisés dans l'étude de Wood et al. (2021) pour comparer des joueurs de football. a) Le « rondo scan » demande de passer un ballon virtuel le plus rapidement possible en direction du but indiqué. b) Le « color combo » demande de toucher un ballon virtuel en approche avec le côté du pied correspondant à la couleur indiquée. c) Le « shoulder sum » demande de compter le nombre de joueurs de chaque couleur présent derrière le participant pour savoir vers quelle cible rediriger un ballon virtuel en approche. d) Le « pressure pass » demande de faire des passes vers des partenaires démarqués, sachant que des adversaires se rapprochent et s'éloignent du participant pour bloquer ou ouvrir les lignes de passes.

(Fig. 1.10-a, c et d). La RV améliore la correspondance des contraintes de visualisation entre le laboratoire et le terrain. Pour autant, la pertinence du test sera limitée s'il ne retranscrit que faiblement les caractéristiques de l'activité liées à la performance (*e.g.* le color combo).

Résumé

La capacité d’un test à capturer la variabilité inter-individuelle liée à la performance sportive dépend de sa validité écologique. Il est possible d’améliorer la validité écologique d’une mesure en ciblant une compétence spécifique à la performance et en renforçant la représentativité des conditions de visualisation, de la modalité de réponse ou encore des contraintes multitâches. En ce qui concerne la tâche de suivi visuel, des versions plus proches de l’activité de conduite (LOCHNER & TRICK, 2014) ou du football (EHMANN et al., 2021) sont possibles en modifiant les conditions de visualisation et en exploitant les environnements virtuels. Les technologies immersives de RV ont l’avantage de permettre à un individu d’agir naturellement dans des conditions expérimentales standardisées, ce qui représente un grand intérêt pour l’évaluation fidèle de la performance sportive au football (WOOD et al., 2021).

SYNTHÈSE ET OBJECTIFS

Percevoir le ballon, ses partenaires et ses adversaires requiert une attribution adéquate de l'attention visuelle dans l'environnement. La tâche de suivi visuel de multiples objets est traditionnellement utilisée pour mimer le besoin d'allouer son attention visuelle entre des sources d'information mobiles dans un environnement encombré. Même si plusieurs recherches constatent un effet de l'expertise en sport collectif sur le suivi visuel, la capacité du test traditionnel à retranscrire les contraintes du terrain est questionnée. Voici une liste non-exhaustive des caractéristiques du football qui sont insuffisamment ou mal représentées dans la tâche traditionnelle :

- Les indices visuels que les joueurs doivent surveiller se déplacent autour d'eux, sur un plan horizontal, et non sur un plan frontal réduit.
- Sur le terrain, ces indices sont liés notamment à des déplacements de joueurs qui se déplacent de façon coordonnée par rapport à la logique du jeu, et non pas de façon aléatoire.
- Lors d'un match, toutes les ressources attentionnelles ne sont pas disponibles pour ne faire que surveiller les autres joueurs.

Ce travail de thèse propose tout d'abord la mise en place d'une nouvelle tâche de suivi visuel contextualisée, le *Multiple-Players-Tracking*, qui intègre les trois caractéristiques susmentionnées pour se rapprocher des contraintes du football (Fig. 2.1). À l'aide d'un système de réalité virtuelle, le participant est ainsi placé sur un terrain de football suivant le point de vue d'un joueur. La tâche qu'il doit réaliser consiste à suivre d'autres joueurs dont les déplacements sont obtenus par des données réelles de match. Enfin, une tâche d'interception de ballon au pied est rajoutée pendant le suivi visuel des joueurs virtuels.

À partir de cette tâche de suivi visuel contextualisée, l'objectif de ce travail de thèse est d'évaluer l'attention visuelle des joueurs de football. Les hypothèses principales à vérifier sont :

1. La performance de suivi visuel est associée au niveau de pratique au football. Pour cela, la performance de suivi visuel est comparée entre des pratiquants et des non-pratiquants, puis entre des joueurs de différents niveaux de compétition.
2. L'effet lié au niveau de pratique sur la performance de suivi visuel est influencé par le niveau de représentativité des contraintes d'évaluation. Pour cela, des conditions expérimentales plus ou moins représentatives des conditions dans lesquelles un joueur doit percevoir ses partenaires et adversaires sont mises en place. D'une part, la performance de suivi visuel est comparée en utilisant des trajectoires réelles de match ou des trajectoires pseudo-aléatoires pour animer les joueurs virtuels. D'autre part, la performance de suivi visuel réalisée dans une double-tâche est comparée à celle réalisée de manière isolée.

Le **chapitre 3** présente la méthodologie générale commune aux 3 études réalisées au cours de cette thèse.

Le **chapitre 4** s'intéresse à l'effet des trajectoires réelles sur la différence de performance de suivi visuel entre joueurs de football et non-pratiquants.

Une première étude se base sur une collecte de données sur écran 2D via une interface web tandis qu'une seconde étude se base sur l'utilisation des HMDs.

Le **chapitre 5** s'intéresse à l'interaction entre l'effet de la double-tâche et du niveau de compétition sur la performance de suivi visuel.

Enfin, le **chapitre 6** présente la discussion générale autour des résultats collectés.



FIGURE 2.1 – Contextualisation de la tâche de suivi visuel au football en RV. La RV est le support technologique utilisé pour générer des conditions de visualisation et d'interaction similaires à celles d'un match de football.

MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Ce travail de thèse propose une nouvelle version de la tâche de suivi visuel, le *Multiple-Players-Tracking*, qui se distingue de la version traditionnelle en deux points : l'apparence de la scène visuelle et l'information contenue dans le déplacement des objets virtuels.

3.1 Description de la tâche Multiple-Players-Tracking

3.1.1 Présentation de l'environnement virtuel

Cette tâche consiste à surveiller le déplacement de plusieurs joueurs sur un terrain virtuel. La tâche est menée selon le point de vue d'un défenseur ou du gardien de but pour correspondre aux situations avec beaucoup de partenaires et d'adversaires répartis sur une plage de 180° face au participant. Dans l'étude 1 sur écran 2D, ce point de vue est surélevé à une hauteur de 2.5 m pour limiter les occultations entre les joueurs virtuels. Comme présenté sur la figure 3.1, les joueurs virtuels sont matérialisés par une forme simplifiée de mannequin sans squelette. Bien qu'aucun ballon ne soit présent dans les études 1 et 2, les mannequins rouges représentent l'équipe en possession du ballon et inversement pour les mannequins bleus. La tâche de suivi visuel et l'environnement virtuel ont été développés à l'aide du moteur Unity 3D¹. La tâche est délivrée sur un écran plat 2D, un HMD et un CAVE dans les études 1, 2 et 3 respectivement (Fig. 3.2). La description de chaque matériel est détaillée dans les sections correspondantes de ce manuscrit.

1. <https://unity.com/>



FIGURE 3.1 – Capture d'écran de l'environnement virtuel. Les joueurs virtuels sont matérialisés par des mannequins sans squelette qui se déplacent sur un terrain de football virtuel.

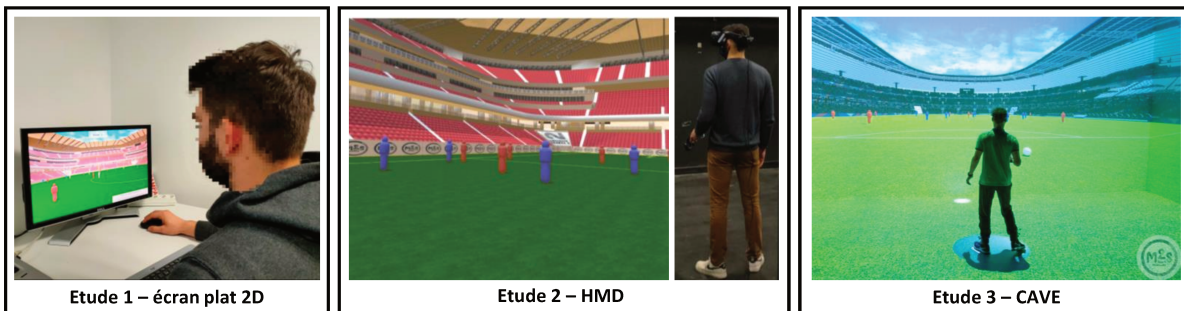


FIGURE 3.2 – Présentation des 3 supports matériels utilisés pour délivrer la tâche de suivi visuel. À gauche, l'environnement est diffusé sur l'ordinateur personnel des participants de l'étude 1. Au centre, l'environnement est délivré dans un HMD pour l'étude 2. À droite, l'environnement est délivré dans un CAVE pour l'étude 3.

3.1.2 Déroulé de la tâche de suivi visuel

À chaque essai, une nouvelle situation est diffusée dans laquelle tous les joueurs sont immobiles au départ. Chaque essai est composé de trois étapes consécutives :

1. **Étape d'identification** : 4 joueurs-cibles (2 bleus et 2 rouges) à suivre sont mis en évidence par un changement de couleur et pointés par une flèche. *N.B.* : pour la troisième étude, seulement 3 joueurs-cibles sont indiqués (voir section 5.1.1.3). Une fois les joueurs-cibles bien identifiés, le participant démarre l'essai en appuyant sur la barre d'espace du clavier dans l'étude 1, sur la gâchette de la manette dans

l'étude 2 ou avec un signal verbal dans l'étude 3.

2. **Étape de suivi** : les flèches disparaissent et les joueurs-cibles retrouvent les mêmes couleurs que les autres joueurs virtuels. Après un délai de 2 s, tous les joueurs virtuels se déplacent pendant 10 s.
3. **Étape de sélection** : avant de terminer un essai, les joueurs-cibles doivent être indiqués avec la souris dans l'étude 1, ou avec un contrôleur dans les études 2 et 3. *N.B.* : dans l'étude 1, les participants ont comme consigne de ne sélectionner que les joueurs-cibles pour lesquels ils ont une haute confiance de réussite (voir section 4.1.4.1).

La performance de suivi visuel est calculée à la fin comme le ratio entre le nombre de joueur-cibles correctement retrouvés par rapport au nombre total de joueurs-cibles présentés.

3.2 Déplacement des joueurs virtuels

Des données réelles de match sont utilisées pour animer le déplacement des joueurs virtuels dans les 3 études. Pour étudier l'influence des trajectoires réelles dans les études 1 et 2, des situations pseudo-aléatoires sont également générées numériquement.

3.2.1 Études 1 et 2 - Influence des trajectoires réelles

3.2.1.1 Sélection des situations réelles de match

Quinze situations sont extraites d'une base de données de 7 500 situations enregistrées lors de matchs réels (source de données : STATS, copyright 2019²). Il est impossible de connaître exactement à partir de quels matchs proviennent ces données, mais il s'agit certainement de matchs professionnels, niveau le plus susceptible de disposer d'un système d'enregistrement des trajectoires. Comme il existe une logique de jeu indépendante du niveau compétition, les situations sont supposées familières à tous les pratiquants (de niveau district à ligue 1).

Les 15 situations ont été sélectionnées de la manière suivante. Les situations de coup

2. <https://www.statsperform.com/team-performance/football-performance/optical-tracking/>

de pied arrêté et de contre-attaque ont été exclues. Ensuite, les situations présentant la vitesse moyenne la plus élevée, la dispersion moyenne la plus élevée et la distance inter-centroïde la plus faible ont été classées pour une inspection visuelle par l'un des investigateurs, qui a finalement sélectionné 15 situations présentant plusieurs croisements de joueurs.

3.2.1.2 Génération des trajectoires pseudo-aléatoires

Le but de la génération des trajectoires pseudo-aléatoires est de déconstruire les relations entre joueurs pouvant exister tout en maintenant des contraintes situationnelles similaires (mêmes vitesse et dispersion des joueurs virtuels). Ainsi, pour chacune des 15 situations réelles qui contiennent des mouvements collectifs structurés (STRU), une situation pseudo aléatoire associée avec des mouvements collectifs non structurés (UNSTRU) est générée selon la procédure suivante.

- Situation originale STRU (Fig.3.3 en haut à gauche) : les joueurs virtuels empruntent des trajectoires réelles de match.
- De la situation STRU à la situation UNSTRU (Fig.3.3 au centre) : les trajectoires des joueurs virtuels sont supprimées, seules les positions initiales et finales sont conservées (points gris). Chaque position finale est reliée à sa position initiale par une ligne grise uniquement pour cette illustration. Les distances maximales sur la longueur et la largeur du terrain qui séparent une position initiale de la position finale associée (en rouge) sont utilisées pour dimensionner une boîte englobante imaginaire avec une marge supplémentaire de 1m de côté. Cette boîte imaginaire est utilisée pour contraindre la trajectoire des joueurs virtuels dans la situation pseudo-aléatoire. Si une boîte imaginaire dépasse les limites du terrain, ses dimensions sont réduites pour correspondre aux limites du terrain de football virtuel. Les trajectoires oranges correspondent aux joueurs de l'équipe en possession du ballon. Les trajectoires bleues sont celles des joueurs de l'équipe adverse.
- Situation générée UNSTRU (Fig.3.3 en bas à droite) : une direction de départ aléatoire est donnée à chaque joueur virtuel qui se déplace ensuite en ligne droite à vitesse constante et qui ne change de direction que lorsqu'il heurte un mur de sa boîte imaginaire (en rouge). La vitesse de déplacement d'un joueur virtuel dans la situation pseudo-aléatoire est approximativement égale à la vitesse moyenne de dé-

placement de ce joueur virtuel dans la situation réelle associée. La distance moyenne parcourue par les joueurs virtuels dans les situations UNSTRU est ainsi approximativement égale à celle de la situation STRU correspondante. Aucune relation logique entre joueurs n'est ainsi supposée dans les situations UNSTRU.

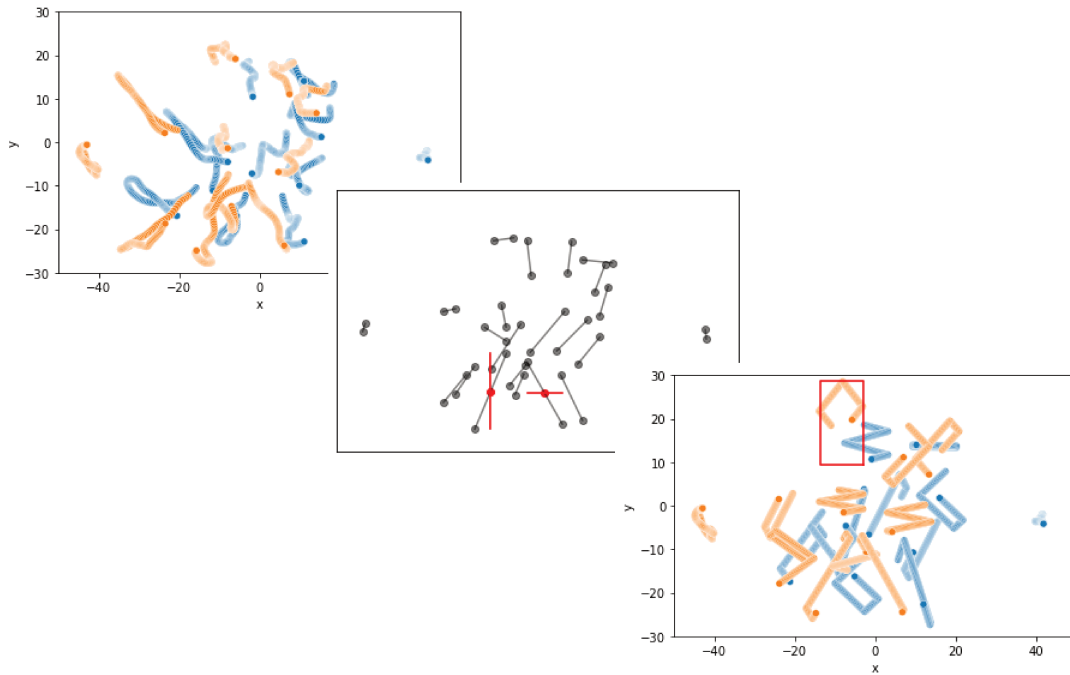


FIGURE 3.3 – Génération des situations pseudo-aléatoires (UNSTRU) à partir des trajectoires réelles (STRU). Dans chaque graphique, les axes représentent les coordonnées du terrain de football en mètres avec l'origine au centre du terrain.

3.2.2 Étude 3 - Influence de la double-tâche

3.2.2.1 Sélection des situations de jeu

Douze situations de 10 secondes contenant une passe en retrait entre la 7e et 9e seconde sont extraites de matchs réels. Les trajectoires du ballon et des 22 joueurs sur le terrain sont obtenues cette fois à partir du championnat professionnel français de Ligue 1 (source de données : STATS, copyright 2021). Dans cette étude, le participant incarne le rôle du receveur du ballon dans une position reculée du terrain, comme un gardien de but ou un défenseur central. La double-tâche consiste à réussir l'interception du ballon virtuel pendant le suivi visuel des joueurs cibles (voir la section 5.1.1.3 pour les détails de la tâche d'interception et des conditions expérimentales). Des situations avec une grande

dispersion des joueurs sur la largeur du terrain sont donc sélectionnées pour reproduire le besoin de prendre l'information sur des sources éloignées tout en contrôlant le ballon. En considérant une division du terrain sur sa largeur en 3 couloirs égaux, au moins 2 coéquipiers et 2 adversaires doivent se trouver dans chaque couloir. L'emplacement du coéquipier effectuant la passe en retrait est réparti de manière égale entre les 3 couloirs dans les 12 situations sélectionnées. Au final, 4 situations contiennent une passe provenant du couloir droit, du couloir central et du couloir gauche.

INFLUENCE DES TRAJECTOIRES RÉELLES SUR L'EFFET LIÉ À LA PRATIQUE DU FOOTBALL

La relation entre la performance de suivi visuel et l'expertise sportive n'a été examinée qu'avec des stimuli complètement génériques (HARRIS et al., 2018 ; QIU et al., 2018 ; JIN et al., 2020), ou spécifiques en matière d'apparence (EHMANN et al., 2021). Aucune étude ne s'est encore intéressée à l'influence que pouvait avoir l'implémentation de comportements rationnels et non plus pseudo-aléatoires pour animer les objets à surveiller. Or, les déplacements relatifs structurés entre partenaires et adversaires sont supposés être des sources d'information exploitées par les joueurs de football pour anticiper l'évolution d'une situation de jeu (voir section 1.1.1.2). Face à des trajectoires réelles de match, les pratiquants pourraient être en mesure d'extraire des informations significatives pour les aider à suivre le déplacement de joueurs virtuels. L'hypothèse principale est que la différence de performance entre des pratiquants et des non-pratiquants est accentuée face à des situations animées avec des trajectoires réelles par rapport à des trajectoires pseudo-aléatoires. Pour vérifier cela, la performance de suivi visuel des joueurs de football et des non-pratiquants est comparée dans deux conditions expérimentales :

- Condition STRU : les joueurs virtuels se déplacent selon des trajectoires réelles de match, générant des mouvements collectifs structurés.
- Condition UNSTRU : les joueurs virtuels se déplacent selon des trajectoires pseudo-aléatoires, générant des mouvements collectifs non-structurés.

Les joueurs de football sont supposés surpasser les non-pratiquants dans les deux conditions expérimentales. Un effet d'interaction est attendu de telle sorte que l'écart entre les groupes soit supérieur dans la condition STRU par rapport à la condition UNSTRU.

La distanciation sociale liée à la pandémie de COVID-19 ne permettait pas la collecte de données en présentiel en 2019. La première étude de ce travail de thèse se base donc sur une collecte de données par une application web, où les participants ont mené le protocole expérimental de chez eux sur leur ordinateur personnel. Pour pallier les limites méthodologiques de la première étude, la seconde réitère la procédure expérimentale mais cette fois en utilisant un HMD pour délivrer l'environnement virtuel en présentiel. En complément, ces deux études proposent respectivement une analyse exploratoire des caractéristiques situationnelles et de l'activité du regard pour expliquer une part de variabilité dans les données.

N.B : uniquement pour la première étude, un groupe de joueurs de sports collectifs autre que le football est également considéré. Ce groupe permet d'observer si les trajectoires spécifiques au football sont mieux perçues uniquement par les joueurs de football ou plus globalement par les joueurs de sports collectifs.

4.1 Étude 1 - Évaluation du suivi visuel dans un environnement virtuel spécifique au football : Une étude basée sur une application web

4.1.1 Introduction

Une autre préoccupation issue de la tâche de suivi visuel traditionnelle concerne les paramètres manipulés un à un pour étudier les limites d'attention visuelle des joueurs de sports collectifs comme le nombre de cibles (QIU et al., 2018; HARRIS et al., 2020b) ou la vitesse des objets (FAUBERT, 2013; MANGINE et al., 2014; MARTÍN et al., 2017; HARRIS et al., 2020b; JIN et al., 2020). Manipuler la vitesse n'est possible qu'avec des situations aux mouvements non réalistes. Cependant, on peut se demander si la norme de la vitesse des objets utilisée pour observer les différences entre les participants est cohérente en comparaison à celle des objets du monde réel. Selon les protocoles expérimentaux, la vitesse relative des objets en mouvement est de 16.8, 21.2 et 25.5 degrés/s (MARTÍN

et al., 2017), ou de 7.4, 9.9 et 12.4 degrés/s (HARRIS et al., 2020b) ou encore de 5, 10 et 15 degrés/s (JIN et al., 2020). Aucune différence de performance de suivi visuel entre des joueurs de basketball et des non-pratiquants n'est observée dans l'étude de JIN et al. (2020) lorsque les objets se déplacent à 5 degrés/s, alors que cette vitesse semble raisonnable compte tenu de la potentiellement faible vitesse, voire de l'immobilité, de certains joueurs à suivre. Si les caractéristiques situationnelles utilisées en laboratoire ne correspondent pas à celles du monde réel, on peut s'interroger sur la généralisation des résultats au terrain et sur leurs implications pratiques (HADLOW et al., 2018). De plus, l'entraînement traditionnel basé sur le suivi visuel vise à augmenter le seuil de vitesse avec lequel les participants sont capables de suivre plusieurs objets (FAUBERT, 2013; ROMEAS et al., 2016; FLEDDERMANN et al., 2019; HARENBERG et al., 2021). Par rapport à la question du transfert, on peut se demander si, d'un point de vue fonctionnel, entraîner la capacité à suivre des objets de plus en plus rapides facilite la distribution de l'attention entre des joueurs dispersés sur le terrain.

Un second objectif, spécifique à cette étude, est de déterminer les caractéristiques situationnelles qui ont pu influencer la performance de suivi visuel des participants. Étant donné que des trajectoires réelles sont utilisées, il n'est pas possible de manipuler *a priori* les conditions expérimentales pour faire varier un paramètre ou une combinaison de paramètres, telles que la vitesse, l'excentricité ou la densité, comme cela est fait habituellement dans la littérature. À la place, une analyse exploratoire est proposée pour regrouper en *clusters* les joueurs-cibles en fonction de leur taux de suivi et de leurs caractéristiques situationnelles propres. De cette manière, l'analyse exploratoire consiste à décrire *a posteriori* les caractéristiques situationnelles significativement associées aux joueurs-cibles difficiles à suivre. Cette analyse est appliquée aux conditions STRU et UNSTRU pour voir si l'ensemble des caractéristiques situationnelles associées aux joueurs difficiles à suivre dépend du type de trajectoires utilisées.

4.1.2 Méthodologie

4.1.2.1 Participants

50 participants (âge : $24,6 \pm 5,5$ ans) ayant une vision normale ou normale avec correction ont volontairement participé à cette expérience. Sur la base de leurs réponses à un questionnaire sur leur pratique sportive, 16 participants (8 femmes, 8 hommes) ont été affectés au groupe NoTEAM, 16 participants au groupe SOCC (2 femmes, 14 hommes) et

18 participants (4 femmes, 14 hommes) au groupe TEAM (4 rugbymen, 13 handballeurs et 1 basketteur). Dans le groupe SOCC, 6 participants jouaient en district, 8 en régional et 2 en national. Dans le groupe TEAM, 2 participants jouaient en départemental, 2 en régional et 14 en national. Tous les niveaux de compétition sont relatifs aux championnats français. Avant de participer, les sujets ont été informés de l'objectif de l'étude, des informations recueillies, de leur possibilité de se rétracter à tout moment avec suppression de leurs données. Leur consentement de participation a été recueilli par le biais d'un formulaire en ligne. La procédure de collecte des données a été validée par le comité d'éthique de l'Université Rennes 2 (numéro de référence : 2021-012). Celle-ci a été réalisée via une application web. Ce processus en ligne ne garantit pas des conditions standardisées de laboratoire, mais il permet tout de même d'accéder à une population motivée qui participe délibérément à l'étude. C'est une procédure qui a déjà été utilisée dans la littérature pour évaluer les performances perceptives d'internautes (SHEN et al., 2014).

4.1.2.2 Matériels

L'environnement virtuel a été déployé dans une version WebGL afin que l'application fonctionne sur le navigateur des participants en mode plein écran (Fig. 4.1). Il était demandé aux participants d'utiliser un ordinateur (pas de smartphone ni de tablette) et de placer leurs yeux à une distance de l'écran équivalente à la largeur de celui-ci. Ainsi, l'écran devait sous-tendre un angle visuel d'environ 53 degrés pour tous les participants. L'application était hébergée à cette adresse <https://aphivu.gitlab.io/visual-tracking/>. À l'issue de la période de collecte de données, les résultats ont été téléchargés et retirés de la base de données en ligne.

4.1.2.3 Procédure expérimentale

Pour commencer, les participants ont effectué une phase d'entraînement de 4 essais pour se familiariser avec l'environnement et la tâche de suivi visuel proposée. Ensuite, le protocole d'évaluation proprement dit consistait en 30 essais randomisés, dont 15 essais pour la condition STRU et 15 essais pour la condition UNSTRU. Seuls les résultats de la phase d'évaluation sont conservés pour l'analyse des données. Le nombre d'essais (15 par condition) peut sembler faible par rapport à d'autres protocoles sur l'expertise du suivi visuel (MARTÍN et al., 2017; QIU et al., 2018), mais il favorisait la concentration des participants jusqu'à la fin de l'expérience. De plus, des différences inter-individuelles dans les performances de suivi visuel peuvent apparaître même avec un faible nombre



FIGURE 4.1 – **Présentation des conditions de réalisation de la tâche de suivi visuel pour l'étude 1.** Le participant doit s'installer à une distance de l'écran équivalente à sa largeur pour standardiser les contraintes de visualisation.

d'essais par condition (HARRIS et al., 2020b). La durée totale de l'expérience, depuis le questionnaire d'information jusqu'à la fin de l'évaluation, était estimée à environ 45 minutes.

4.1.2.4 Manipulation du point de vue

Dans la tâche de suivi proposée, nous avons choisi de ne pas restreindre le mouvement des joueurs virtuels, y compris les joueurs-cibles, à la fenêtre affichée sur l'écran de l'ordinateur. Pour les suivre, le participant pouvait pivoter le point d'observation autour de l'axe vertical, *i.e.* vers la gauche ou la droite, en utilisant les flèches directionnelles correspondantes. Aucune autre modification du point d'observation n'était possible. La distance angulaire maximale entre les joueurs-cibles ne dépassait jamais la plage couverte par le point de vue affiché, c'est-à-dire 90° . En faisant pivoter le point d'observation de manière appropriée, tous les joueurs-cibles pouvaient rester dans le champ de vision à tout moment. Des études précédentes ont montré que les changements de point d'obser-

vation affectent les performances de suivi visuel des participants. Dans l’étude de HUFF et al. (2009), le point d’observation des participants tournait brusquement autour de la scène pendant la tâche de suivi visuel. Dans l’étude de THOMAS et SEIFFERT (2010), les participants tournaient autour de la scène de manière passive ou active. Étant donné que le mouvement du point d’observation interfère avec le suivi d’objets multiples, le fait de permettre le pivotement du point d’observation affecte probablement les performances de suivi des participants dans cette étude. Cependant, la différence ici est que les participants ne tournaient pas autour de la scène, mais se réorientaient pour suivre les joueurs comme ils le feraient sur un vrai terrain de football. Ils contrôlaient eux-mêmes les rotations et le faisaient pour réussir la tâche de suivi visuel. Sur un vrai terrain de football, les joueurs se déplacent, pivotent leur corps et leur tête, afin de recueillir des informations sur leur environnement (MCGUCKIAN et al., 2018a; AKSUM et al., 2021). Ainsi, cette composante de rotation avait pour but de se rapprocher des contraintes du terrain.

4.1.2.5 Analyse des données

Le logiciel R est utilisé pour le traitement statistique des données. Une ANOVA à modèle mixte est réalisée pour observer l’effet intra-sujet de la condition expérimentale (STRU et UNSTRU), l’effet inter-sujet de la pratique sportive (SOCC, TEAM et NoTEAM) et leur effet d’interaction sur la performance de suivi visuel. Le seuil de significativité est fixé à 0.05. La taille de l’effet (η_p^2) est calculée pour chaque effet principal. Le t-test avec correction de Bonferroni est utilisé pour l’analyse post-hoc. Les hypothèses de normalité et d’homogénéité des variances sont vérifiées avec les tests de Shapiro-Wilk et de Levene respectivement.

Pour l’analyse exploratoire, une Analyse en Composantes Principales (PCA : Principal Component Analysis) et un Clustering Hiérarchique sur Composantes Principales (HCPC : Hierarchical Clustering on Principal Components) sont réalisés pour les deux conditions expérimentales (STRU et UNSTRU) en utilisant le package FactoMineR (LÊ et al., 2008). L’objectif est de regrouper les joueurs-cibles en fonction de leur taux de suivi avec succès et de leurs caractéristiques situationnelles. Quatre caractéristiques situationnelles connues pour mettre en difficulté la tâche de suivi sont étudiées dans cette analyse, à savoir *la vitesse des joueurs-cibles* (TOMBU & SEIFFERT, 2011; HOLCOMBE & CHEN, 2012), *la dispersion spatiale des joueurs-cibles* (SHIM et al., 2008), *la densité des perturbateurs près des joueurs-cibles* (IORDANESCU et al., 2009; VATER et al., 2017a)

et la *densité des perturbateurs de même couleur près des joueurs-cibles* (FERIA, 2012). Cependant, un joueur-cible peut également être perdu en raison des demandes liées aux trois autres joueurs-cibles impliqués dans la même situation. Ainsi, 4 caractéristiques de groupe, liées aux trois autres joueurs-cibles de la même situation, sont également calculées. Les caractéristiques situationnelles sont calculées en terme d'angle en degré, par rapport au point de vue de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Pour compléter, le taux de suivi avec succès d'un joueur-cible est calculé pour les 3 groupes de participants. Par conséquent, chaque joueur-cible est décrit par 11 variables centrées réduites (voir la table 4.1 pour la description des variables).

Pour les deux conditions expérimentales, un tableau de données de 60 lignes (4 joueurs-cibles dans chacune des 15 situations) par 11 colonnes (3 variables de ratio de suivi, 4 caractéristiques individuelles et 4 caractéristiques de groupe) est fourni comme entrée pour l'analyse exploratoire. Le nombre de composantes principales (PCs) à conserver suite à la PCA est choisi pour expliquer 70% de la variance totale. Les composantes retenues sont utilisées dans la procédure HCPC pour regrouper les joueurs-cibles en fonction de leurs similarités. Le nombre de clusters renvoyés par le HCPC est automatiquement défini pour maximiser les différences inter-clusters et minimiser les différences intra-clusters. Les tests d'association effectués dans la procédure HCPC indiquent si les valeurs moyennes des caractéristiques étudiées de chaque cluster sont significativement différentes des valeurs moyennes de l'ensemble des 60 joueurs-cibles dans chaque condition expérimentale.

| Acronyme | Variable | Description |
|--------------------|--|--|
| Ratio.SOCC | Performance de SOCC | Ratio de suivi visuel de SOCC |
| Ratio.TEAM | Performance de TEAM | Ratio de suivi visuel de Team |
| Ratio.NoTEAM | Performance de NoTEAM | Ratio de suivi visuel de NoTEAM |
| Ind.Speed | Vitesse individuelle | Vitesse angulaire moyenne du joueur-cible relative au point de vue du participant |
| Ind.Density | Densité individuelle des perturbateurs | Fréquence de perturbateurs à maximum 3° du joueur-cible |
| Ind.DensityCol | Densité individuelle des perturbateurs de même couleur | Fréquence de perturbateurs de même couleur à maximum 3° du joueur-cible |
| Ind.DistanceTarget | Distance individuelle du plus proche joueur-cible | Distance minimale moyenne avec le plus proche joueur-cible |
| Grp.Speed | Vitesse du groupe | Vitesse angulaire moyenne des trois autres joueurs-cibles |
| Grp.Density | Densité des perturbateurs autour du groupe | Fréquence moyenne de perturbateurs à maximum 3° d'un autre joueur-cible |
| Grp.DensityCol | Densité des perturbateurs de même couleur autour du groupe | Fréquence moyenne de perturbateurs de même couleur à maximum 3° d'un autre joueur-cible |
| Grp.Disp | Dispersion du groupe | Ecart type moyen de l'angle entre les trois autres joueurs-cibles par rapport au moins de vue du participant |

TABLE 4.1 – Description des caractéristiques prises en compte dans l'analyse exploratoire.

4.1.3 Résultats

4.1.3.1 Performance de suivi visuel

Les performances de suivi visuel sont indiquées sur la figure 4.2 et dans le tableau 4.2. L'ANOVA à modèle mixte révèle un effet significatif de la condition expérimentale ($F(1,47)=33.718$, $p<0.001$, $\eta_p^2=0.418$), un effet significatif du groupe ($F(2,47)=3.537$, $p=0.037$, $\eta_p^2=0.131$), mais aucun effet d'interaction entre ces deux facteurs ($F(2,47)=0.844$, $p=0.437$, $\eta_p^2=0.035$) sur la performance de suivi visuel. L'analyse post-hoc montre une per-

formance de suivi visuel plus élevée pour SOCC que pour NoTEAM ($p=0.002$), mais aucune différence entre TEAM et NoTEAM ($p=0.071$) ou entre SOCC et TEAM ($p=0.63$).

| | SOCC (n=16) | TEAM (n=18) | NoTEAM (n=16) |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| STRU | 0.756 (± 0.110) | 0.798 (± 0.107) | 0.658 (± 0.128) |
| UNSTRU | 0.691 (± 0.103) | 0.669 (± 0.093) | 0.594 (± 0.122) |

TABLE 4.2 – Performance moyenne de suivi visuel (et écart type) par groupe et condition.

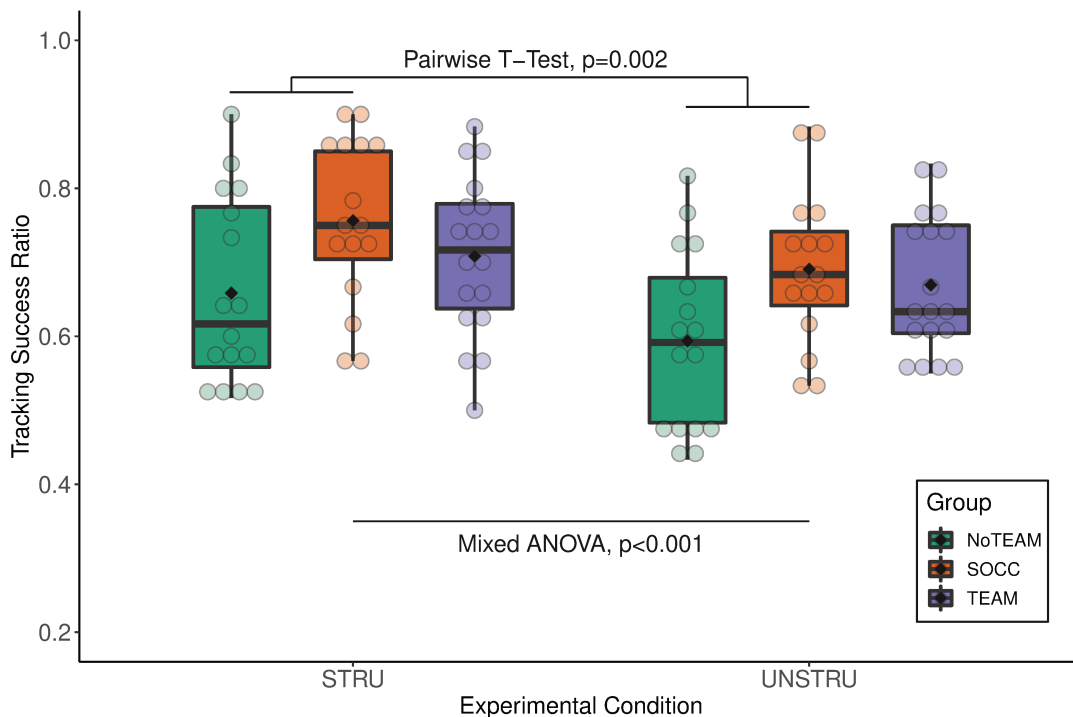


FIGURE 4.2 – Performance de suivi visuel par groupe dans les deux conditions expérimentales. Les boxplots montrent la distribution des performances individuelles (points transparents) et un \blacklozenge représente la moyenne d'un groupe.

4.1.3.2 Analyse des caractéristiques situationnelles associées aux joueurs-cibles difficiles à suivre

Cette analyse exploratoire se concentre sur les caractéristiques situationnelles les plus significativement associées aux groupes de joueurs-cibles difficiles à suivre pour les deux conditions expérimentales. Les résultats des tests d'association sont indiqués en annexe 6.6.2.

Condition STRU Les quatre premières PCs de la PCA, avec des variances respectives de 27.2%, 20.6%, 16.3% et 8.7%, sont retenues pour exprimer une variance cumulée de 72.9%. Le biplot de la figure 4.3-A affiche les 11 variables inspectées et les 60 joueurs-cibles individuels dans le plan formé par les deux premières PCs. Les 3 ratios de suivi sont assez bien représentés ($\cos^2 > 0.6$) sur ce plan, et se dirigent dans la même direction, ce qui suggère que la difficulté pour suivre un joueur-cible n'est pas dépendante du groupe de participants. Sur la base de la distance entre les joueurs-cibles dans les 4 PCs retenues, l'algorithme HCPC regroupe les 60 joueurs-cibles en trois clusters distincts (Fig. 4.3). Pour des raisons de lisibilité, seules les deux premières composantes sont présentées dans la figure 4.3-A. Le graphique peut être trompeur en raison du chevauchement important des trois clusters de joueurs-cibles, mais pour rappel, les troisième et quatrième PCs sont également retenues pour le clustering. Les valeurs moyennes des 11 variables sont présentées dans des couleurs différentes pour chacun des 3 clusters de joueurs-cibles dans le graphique radar de la figure 4.3-B.

Le cluster #1 est composé de 10 joueurs-cibles associés à des valeurs de Ratio.NoTeam, Ratio.Team, Ratio.Socc, Ind.DensityCol, Grp.Disp, Grp.Density significativement plus faibles et à des valeurs de Ind.DistTarget, Grp.Speed significativement plus élevées que la moyenne globale (tableau A1). Le cluster #2 est composé de 16 joueurs-cibles associés à des valeurs de Grp.Disp, Ind.DistTarget, Ratio.Team, Ratio.Socc significativement plus faibles et à des valeurs de Grp.Density, Grp.DensityCol, Ind.Density, Ind.DensityCol significativement plus élevées que la moyenne globale (tableau A1). Le cluster #3 est composé de 34 joueurs-cibles associés à des valeurs de Grp.DensityCol, Ind.Density, Grp.Density, Ind.DistTarget, Grp.Speed significativement plus faibles et à des valeurs de Ratio.Team, Grp.Disp, Ratio.Socc, Ratio.NoTeam, Ind.Speed significativement plus élevées que la moyenne globale (tableau A1).

Condition UNSTRU Les quatre premières PCs de la PCA, avec des variances respectives de 28.6%, 16.7%, 15.0% et 10.3%, sont retenues pour exprimer une variance cumulée de 70,6%. Le biplot de la figure 4.4-A montre les 11 variables examinées et les 60 joueurs-cibles individuels dans le plan formé par les deux premières PCs. Les 3 ratios de suivi par groupe, assez bien représentés sur le plan ($\cos^2 > 0.6$), se dirigent dans la même direction. Ce qui suggère également que les joueurs-cibles difficiles à suivre ne varient pas de façon importante entre les groupes de participants. Les caractéristiques situationnelles assez bien représentées ($\cos^2 > 0.6$) dans ce même plan sont Grp.Density et Grp.Speed. Selon

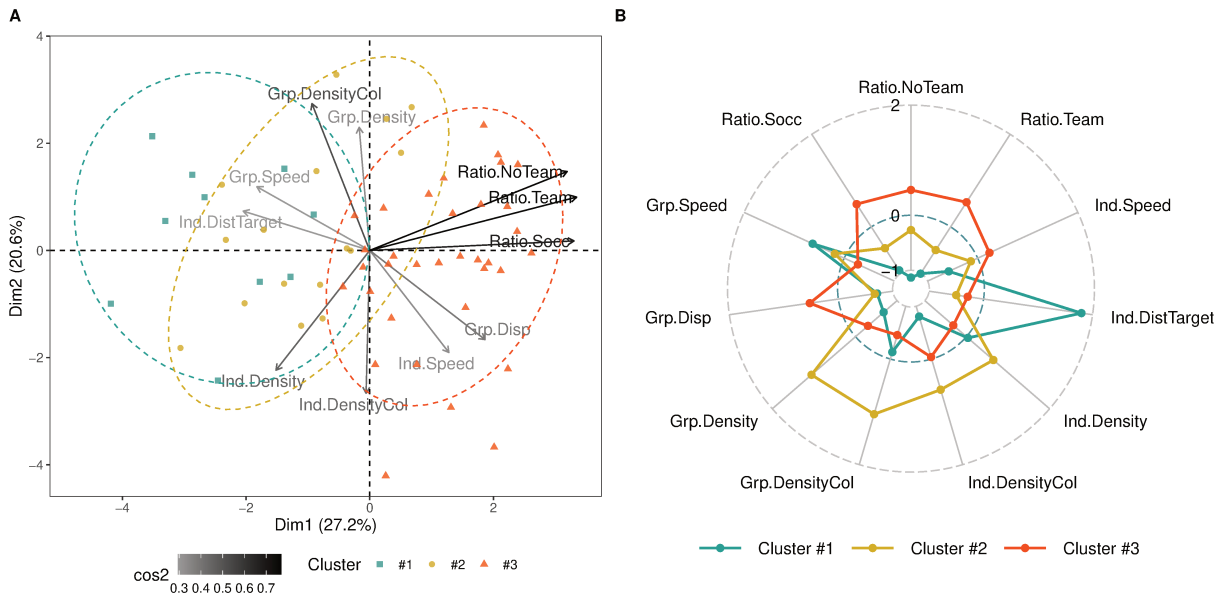


FIGURE 4.3 – **Clustering des joueurs-cibles dans la condition STRU.** A) Biplot avec les variables étudiées et les joueurs-cibles individuels projetés sur les deux premières dimensions retournées par la PCA. Le gradient de couleur exprime la quantité de variance conservée sur ce plan pour chaque variable. La forme et la couleur des joueurs-cibles individuels sont données par rapport à leur cluster respectif calculé avec l’algorithme HCPC. B) Graphique radar avec les variables centrées réduites pour chaque cluster de joueurs-cibles retourné par l’algorithme HCPC. Plus une variable est proche du centre, plus sa valeur est faible et inversement. La ligne circulaire du milieu représente la valeur moyenne de chaque variable pour tous les joueurs-cibles. Plus la valeur d’un cluster est éloignée de la ligne centrale du cercle, plus les joueurs-cibles de ce cluster sont différents des autres.

la direction des flèches, la probabilité d’un joueur-cible d’être suivi avec succès est négativement associée à la densité des perturbateurs proches et à la vitesse des trois autres joueurs-cibles présents dans la même situation. Sur la base de la distance entre les joueurs-cibles dans les 4 PCs retenues, l’algorithme HCPC regroupe les 60 joueurs-cibles en trois clusters distincts (Fig. 4.4). La valeur des 11 variables pour les 3 clusters de joueurs-cibles est présentée dans le graphique radar de la figure 4.4-B.

Le cluster #1 est composé de 25 joueurs-cibles associés à des valeurs de Grp.Density, Grp.Disp, Grp.Speed, Grp.DensityCol, Ind.Density significativement plus faibles et à des valeurs de Ratio.Team, Ind.DistTarget, Ratio.Socc significativement plus élevées que la moyenne globale (tableau A2). Le cluster #2 est composé de 24 joueurs-cibles associés à

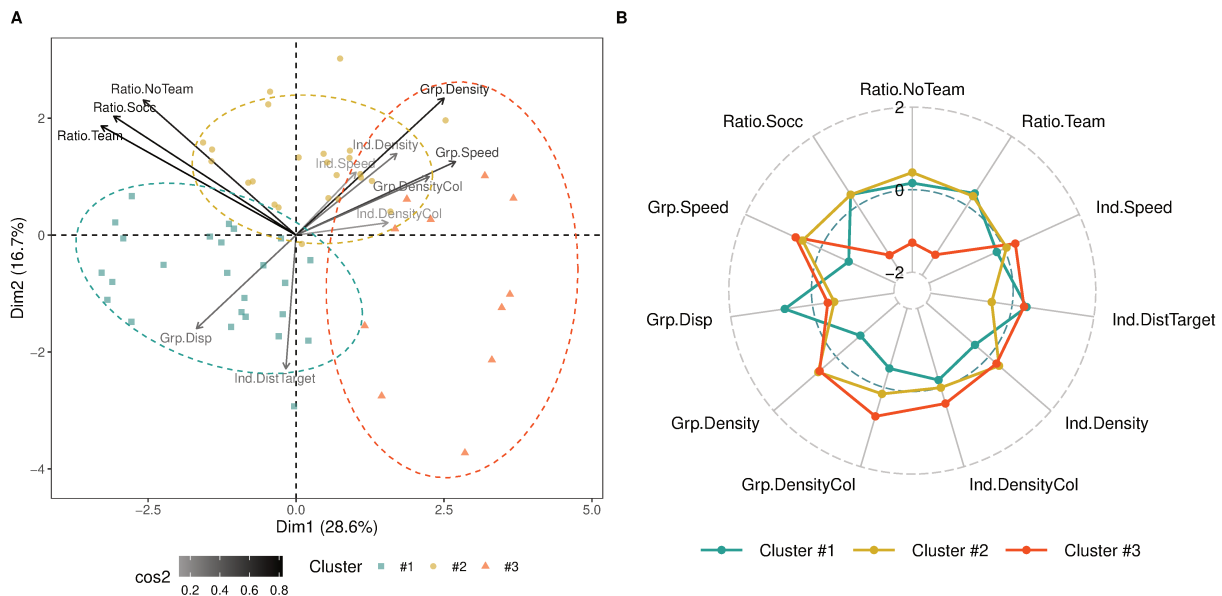


FIGURE 4.4 – **Clustering des joueurs-cibles dans la condition UNSTRU.** A) Biplot avec les variables examinées et les joueurs-cibles individuels projetés sur les deux premières dimensions retournées par la PCA. B) Graphique radar avec les variables centrées-réduites pour chaque cluster de joueurs-cibles retourné par l'algorithme HCPC.

des valeurs de Grp.Disp, Ind.DistanceTarget significativement plus faibles et à des valeurs de Grp.Density, Grp.Speed, Ratio.NoTeam, Ind.Density et Ratio.Socc significativement plus élevées que la moyenne globale (tableau A2). Le cluster #3 est composé de 11 joueurs-cibles associés à des valeurs de Ratio.Socc, Ratio.Team, Ratio.NoTeam significativement plus faibles et à des valeurs de Grp.DensityCol, Grp.Speed significativement plus élevées que la moyenne globale (tableau A2).

4.1.4 Discussion

4.1.4.1 Performance de suivi visuel

La performance moyenne de suivi visuel des participants est significativement plus élevée dans la condition STRU que dans la condition UNSTRU. Une explication possible est que les mouvements des joueurs virtuels dans les situations UNSTRU sont moins prévisibles et donc plus difficiles à suivre (voir HOPE et al., 2010 pour une manipulation de l'entropie dans le mouvement des objets). Dans les situations UNSTRU, les joueurs virtuels peuvent changer brusquement de direction sans changer de vitesse et il n'est

pas possible pour les participants de prédire le moment et la direction du virage. En revanche, dans les situations STRU, puisque les trajectoires sont extraites de matchs réels, les joueurs virtuels décelèrent avant de changer de direction et empruntent des trajectoires moins abruptes lorsqu'ils tournent.

Un effet de groupe est observé dans cette étude où seul SOCC surpasse NoTEAM de manière significative, quelle que soit la condition expérimentale. Ce résultat est partiellement cohérent avec la littérature qui rapporte une meilleure capacité de suivi visuel chez les joueurs de sports collectifs que chez des athlètes de sports individuels (QIU et al., 2018 ; HARRIS et al., 2020b ; JIN et al., 2020). Une dispersion assez importante des valeurs intra-groupe est observée, suggérant que des facteurs confondants autres que la simple pratique sportive ont probablement affecté les performances des participants. Concernant le niveau de compétition, le faible nombre de participants pratiquant un sport collectif (16 footballeurs, 18 joueurs d'un autre sport collectif) ne permet pas de comparer des groupes équilibrés de participants ayant des niveaux de compétition différents. Il est donc impossible de conclure si l'effet de groupe est uniquement lié à la simple pratique d'un sport collectif ou s'il est affecté par un quelconque effet du niveau de compétition (SWANN et al., 2015 ; QIU et al., 2018). La non-différence des performances de suivi entre SOCC et TEAM peut être partiellement expliquée par la pratique de sports collectifs (rugby, handball et basket-ball) qui peuvent présenter des exigences de suivi similaires à celles du football (SMEETON et al., 2004).

Contrairement à nos attentes, la différence de performance de suivi visuel entre les joueurs de football et les autres participants n'est pas plus grande face à des stimuli impliquant des mouvements spécifiques au football que face à des stimuli impliquant des mouvements pseudo-aléatoires. Ce résultat suggère que diriger des joueurs virtuels avec des trajectoires de jeu réelles n'est certainement pas suffisant pour recréer les conditions de jeu dans lesquelles les joueurs doivent suivre leurs coéquipiers et leurs adversaires sur le terrain.

Certaines limites concernant la procédure expérimentale doivent être soulignées. Malgré l'avantage de permettre la collecte de données en ligne (SHEN et al., 2014), l'utilisation d'une application web ne permet pas de contrôler les conditions dans lesquelles les participants effectuent la tâche, notamment en ce qui concerne le respect des instructions relatives à la distance de l'écran. Cette consigne visait à assurer la standardisation des conditions de visualisation, car les performances de suivi visuel peuvent être influencées

par la dimension de la zone de suivi et la vitesse relative des cibles (FRANCONERI et al., 2008). Pour les futures études en ligne, des méthodes validées sont maintenant disponibles et doivent être prises en compte pour contrôler la distance d'observation et la taille du stimulus (LI et al., 2020; LAGO, 2021). En ce qui concerne la question de la taille du stimulus dans l'étude actuelle, la tâche ne peut être effectuée qu'en mode plein écran. La dimension en pixels de la fenêtre du navigateur des participants est enregistrée afin de contrôler son influence sur la performance de suivi visuel. La hauteur des fenêtres varie de 578 à 1137 pixels et la largeur des fenêtres varie de 960 à 1920 pixels. La corrélation de Pearson entre la performance moyenne de suivi et la hauteur de l'écran est de 0.141 ($p=0.425$). La corrélation de Pearson entre la performance moyenne de suivi et la largeur de l'écran est de -0.360 ($p=0.306$). Par conséquent, la performance de suivi visuel des participants ne semble pas être influencée de façon importante par la dimension de la fenêtre du navigateur qui reflète la taille de leur écran d'ordinateur. Cependant, la fréquence d'affichage du navigateur des participants n'est pas collectée. La latence peut influencer la vitesse des objets et perturber la fluidité du mouvement pendant la tâche. Bien que les participants ne se soient pas plaints, on ne peut que supposer sans garantie que peu ou pas de latence s'est produite pendant l'expérience. Lors des pré-tests avec différents ordinateurs, navigateurs et réseaux, aucune latence n'a été constatée de la part des investigateurs. Les données nécessaires à l'exécution d'un essai sont chargées dans le cache du navigateur avant le début de l'essai, ce qui a limité l'influence de toute latence du réseau lors du déplacement des joueurs virtuels. Une autre limite est que tous les participants n'ont certainement pas respecté la consigne de ne sélectionner que les joueurs-cibles dont ils étaient suffisamment sûrs qu'ils avaient réussi le suivi. Cependant, il est supposé que ce biais induit par la possibilité de deviner les joueurs-cibles par hasard pendant la sélection est mineur puisque la probabilité de trouver 1 joueur-cible parmi 17 perturbateurs reste faible. De plus, le fait de trouver un joueur-cible parmi des joueurs virtuels proches reflète tout de même un bon niveau de suivi visuel.

D'autres limites peuvent être notées en ce qui concerne l'utilisation de stimuli 2D contraints par le cadre d'un ordinateur. Premièrement, les informations de profondeur, qui sont importantes pour le suivi d'objets multiples dans un espace 3D (COOKE et al., 2017), ne sont pas disponibles. Deuxièmement, le pivotement du point de vue à l'aide des touches du clavier est peu représentatif des possibilités d'exploration visuelle sur le terrain (MCGUCKIAN et al., 2018b). De plus, nous supposons que la plupart des participants ont effectué la tâche de suivi proposée en position assise, ce qui ne représente pas les

contraintes motrices réelles d'un match de football et ne reflète donc pas l'allocation des ressources attentionnelles liée au contrôle postural. Ces limites liées aux conditions de visualisation sont levées dans la suite de ces travaux grâce à l'utilisation de la RV.

4.1.4.2 Analyse des caractéristiques situationnelles associées aux joueurs-cibles difficiles à suivre

L'objectif de cette approche est de regrouper les joueurs-cibles en fonction de leur capacité à être suivis avec succès et de leurs caractéristiques situationnelles. Pour les deux conditions expérimentales, les 60 joueurs-cibles sont regroupés en 3 clusters. Cette analyse se focalise sur la description des joueurs-cibles difficiles à suivre dans les deux conditions expérimentales. Les clusters de joueurs-cibles difficiles à suivre sont identifiés lorsque les taux de suivi visuel des groupes de participants sont inférieurs à la moyenne globale. Les joueurs-cibles des clusters #1 et #2 sont ainsi considérés comme difficiles à suivre dans la condition STRU (Fig 4.3-B) et les joueurs-cibles du cluster #3 sont considérés comme difficiles à suivre dans la condition UNSTRU (Fig 4.4-B).

En ce qui concerne la condition STRU, les joueurs-cibles difficiles à suivre du cluster #1 sont susceptibles d'être perdus car ils sont éloignés (Ind.DistTarget élevée) des trois autres joueurs-cibles qui sont regroupés (Grp.Disp faible) et qui se déplacent relativement rapidement (Grp.Speed élevée). Ce cas illustre la difficulté de recueillir des informations sur des zones de terrain éloignées. Les participants n'ont probablement pas réparti leur attention de manière équitable entre les 4 joueurs-cibles, mais se sont plutôt concentrés sur les trois joueurs-cibles regroupés qui se déplaçaient de manière coordonnée dans la même zone. La stratégie de regroupement a probablement assuré le succès du suivi visuel sur trois joueurs-cibles au détriment du 4^e (YANTIS, 1992; FEHD & SEIFFERT, 2008). Pour les joueurs-cibles du cluster #2, la difficulté est probablement liée à l'interférence visuelle induite par la densité des perturbateurs entourant l'ensemble des joueurs-cibles (Grp.Density, Grp.DensityCol, Ind.Density et Ind.DensityCol élevées) (IORDANESCU et al., 2009; VATER et al., 2017a). Ces joueurs-cibles difficiles à suivre reflètent la difficulté de détailler les indices dans des régions très encombrées par des joueurs des deux équipes.

En ce qui concerne la condition UNSTRU, les joueurs-cibles difficiles à suivre du cluster #3 sont caractérisés par une très forte densité de perturbateurs de même couleur autour des autres joueurs-cibles impliqués dans la même situation (Grp.DensityCol élevée) et qui se déplacent relativement rapidement (Grp.Speed élevée). Ces joueurs-cibles

difficiles à suivre sont probablement perdus non pas à cause de leurs propres caractéristiques situationnelles mais à cause de celles des autres joueurs-cibles. Les demandes de suivi liées à l'encombrement et à la vitesse des autres joueurs-cibles semblent suffisamment importantes pour affecter le succès du suivi des joueurs-cibles du cluster #3 (HOLCOMBE & CHEN, 2012).

En résumé, lorsque l'on compare les résultats entre les conditions expérimentales, les caractéristiques situationnelles associées aux joueurs difficiles à suivre diffèrent. Dans la condition STRU, les joueurs-cibles isolés (cluster #1) et les joueurs-cibles dans un espace très encombré (cluster #2) sont plus susceptibles d'être perdus. Alors que dans la condition UNSTRU, un joueurs-cible a plus de chances d'être perdu lorsque les autres à suivre se déplacent rapidement et sont à proximité de perturbateurs de même couleur. À l'inverse dans la condition UNSTRU, les caractéristiques de vitesse ont un effet négatif plus marqué sur la performance de suivi visuel (Fig. 4.4-B). Ce résultat suggère qu'avec des situations réelles, la distribution spatiale des joueurs virtuels a une plus grande influence sur les performances de suivi visuel qu'avec des situations pseudo-aléatoires. De plus, cette étude rapporte une vitesse moyenne des joueurs-cibles avec des trajectoires réelles de $3.3 \pm 1.6^\circ/\text{s}$, ce qui est inférieur à la gamme de vitesse manipulée dans d'autres études sur l'influence de la performance sportive (MARTÍN et al., 2017; HARRIS et al., 2020b; JIN et al., 2020). Le suivi de joueurs qui courent à une vitesse élevée pourrait être plus difficile que le suivi de joueurs qui marchent lentement (HOLCOMBE & CHEN, 2012). Nous encourageons tout de même les recherches futures sur la relation entre la performance sportive et le suivi visuel à s'appuyer également sur les caractéristiques spatiales et pas seulement sur la caractéristique de vitesse. Pour vérifier la pertinence de cette approche, les profils de joueurs-cibles pourraient être utilisés à l'avenir dans la procédure de sélection des situations à délivrées dans la tâche de suivi visuel de multiples joueurs.

Toutefois, ces résultats présentent certaines limites. Premièrement, seul un ensemble non exhaustif de caractéristiques situationnelles est analysé dans cette étude. D'autres caractéristiques, comme l'entropie (HOPE et al., 2010), pourraient être ajoutées pour affiner la caractérisation des clusters. Les caractéristiques sont exprimées en matière d'angles relatifs au point de vue, ce qui ne tient pas compte de la distance absolue entre un joueur virtuel et le point d'observation du participant. La taille perçue d'un joueur-cible diminue avec sa distance par rapport à l'emplacement de l'observateur, ce qui peut augmenter la difficulté de la tâche de suivi (FEHD & SEIFFERT, 2010). À l'avenir, il serait judicieux

d'ajouter des caractéristiques calculées dans un repère allo-centré. Deuxièmement, l'analyse exploratoire s'est concentrée uniquement sur les caractéristiques dont la moyenne est calculée sur les 10 secondes de suivi. Les valeurs obtenues peuvent donner de faibles indications sur les critères de difficulté si un joueur-cible est perdu dès le début de l'essai. L'analyse de séries temporelles serait d'une grande utilité pour identifier le moment où un joueur-cible est perdu et pour concentrer l'analyse avant ce moment, en particulier lorsqu'il s'agit de situations très dynamiques avec de nombreuses variations de vitesse (MEYERHOFF et al., 2016).

4.1.5 Conclusion

La présente étude basée sur une collecte de données via internet compare les performances des participants sur une tâche de suivi en fonction de leur pratique sportive face à des stimuli avec et sans mouvements spécifiques au football. Les données ne vérifient pas l'hypothèse selon laquelle la différence de performance de suivi entre les joueurs de football et les autres participants est plus importante face à des stimuli dirigés par des trajectoires réelles de match. Cependant, une analyse exploratoire basée sur une procédure HCPC est menée pour déterminer les caractéristiques situationnelles associées aux joueurs-cibles qui sont difficiles à suivre. Les résultats obtenus donnent ainsi une première estimation des facteurs pouvant rendre difficile le suivi visuel de joueurs sur un terrain de football. Pour pallier les limites liées aux modalités d'affichage et d'interaction, la prochaine étude utilisera les technologies de RV.

4.2 Étude 2 - Multiple-Players-Tracking en réalité virtuelle : Influence des trajectoires spécifiques au football et relation avec l'activité du regard

4.2.1 Introduction

Premièrement, l'effet d'interaction entre le type de trajectoires utilisées pour animer les joueurs virtuel et le groupe de participants n'a pas été vérifié dans l'étude précédente. Une des explications émises concerne la faible représentativité des conditions de visualisation liées à l'utilisation d'écran 2D et des touches du clavier pour pivoter la caméra. L'objectif principal de cette seconde étude est ainsi de réitérer cette comparaison en délivrant cette fois-ci la tâche de suivi visuel en réalité virtuelle.

Deuxièmement, il existe encore très peu de données à propos de l'effet de l'expertise sur l'activité du regard pendant une tâche de suivi visuel. À notre connaissance, HARRIS et al. (2020b) ont mené la seule étude comparant l'activité du regard en fonction du type de pratique sportive pendant une tâche de suivi visuel. Malgré une performance de suivi visuel supérieure chez des joueurs de sports collectifs par rapports à des athlètes de sports individuels, les auteurs n'ont pas constaté de différence en matière d'activité du regard entre les deux groupes de participants (HARRIS et al., 2020b). Il est supposé ici que le manque de différences significatives est causé par une représentativité limitée des conditions de visualisation (voir 1.3.2.3). Un objectif secondaire est donc de comparer l'activité du regard lors de la tâche de suivi visuel entre des joueurs de football et des non-pratiquants. Etant donné que l'activité du regard est conditionnée par les contraintes situationnelles (VATER et al., 2017a), les comparaisons entre les groupes de participants sont faites en fonction de la distribution spatiale des joueurs dans la situation.

4.2.2 Méthodologie

4.2.2.1 Participants

Trente-trois volontaires ayant une vision normale ou normale avec correction ont participé à l'expérience. Deux participants sont retirés de l'analyse des données parce que 20 % de leurs essais n'étaient pas valides au regard des consignes de sélection des joueurs-cibles. Finalement, 16 participants (24.3 ± 3.4 ans, 3 femmes - 13 hommes) qui

jouaient au football en compétition depuis une moyenne de 15.6 ans (± 3.9) pendant 6.6 heures par semaine (± 2.5) au moment de l'expérience ont été inclus dans le groupe SOCCER. Quatre participants jouaient au niveau du district, 9 au niveau régional et 3 au niveau national français. Quinze participants (28.3 ± 4.6 ans, 8 femmes - 7 hommes) qui ne pratiquaient aucun sport d'équipe en compétition ont rejoint le groupe CONTROL. Un consentement écrit a été obtenu avant la participation. Le protocole expérimental et la procédure de collecte des données ont été validés au préalable par un comité national français d'éthique en sciences du sport (IRB00012476-2021-16-04-102).

4.2.2.2 Matériels

Le HMD utilisé avec un oculomètre Tobii intégré était un HTC Vive Pro Eye. Les fréquences d'affichage et d'enregistrement de l'oculomètre étaient de 90 Hz. Selon les spécifications du matériel¹, la marge d'erreur de l'oculomètre était de 1.1° . La résolution du HMD était de 1440×1600 pixels par œil (2880×1600 pixels combinés) avec un champ de vision total de 110° . L'espace de capture du HMD utilisé était de 2×2 m, ce qui permettait aux participants de réguler leur position et leur orientation pendant la tâche de suivi (Fig. 4.5). Un contrôleur HTC Vive a été utilisé par les participants pour traiter les différentes phases de la tâche de suivi. Le SDK SRapinal a été utilisé pour accéder aux données du regard enregistrées par l'oculomètre.

4.2.2.3 Procédure

Les participants ont effectué 30 essais au total. Parmi ceux-ci, 15 essais étaient réalisés dans une condition expérimentale dite structurée (STRU), présentant des scénarios de matchs de football réels, qui comprenaient donc des mouvements collectifs structurés entre les joueurs virtuels. Les 15 autres essais étaient réalisés dans une condition expérimentale dite non structurée (UNSTRU), présentant des scénarios de mouvements pseudo-aléatoires sans structure collective dans les mouvements relatifs des joueurs virtuels. Ces essais ont été présentés aux participants dans un ordre aléatoire. Avant l'évaluation, les participants ont complété une calibration de l'oculomètre et une phase d'entraînement de quatre essais pour se familiariser avec l'environnement virtuel et la tâche de suivi visuel. Seuls les résultats de la phase d'évaluation ont été analysés. La durée totale de l'évaluation était d'environ 35 minutes.

1. <https://www.vive.com/fr/product/vive-pro-eye/specs/>



FIGURE 4.5 – **Présentation des conditions de réalisation de la tâche de suivi visuel pour l'étude 2.** A) Installation du participant dans la zone synchronisée avec l'environnement virtuel. B) Capture d'écran du retour visuel du participant en temps réel.

4.2.2.4 Classification des comportements du regard

Plusieurs algorithmes existent et reposent sur des valeurs seuils d'un ou plusieurs paramètres cinématiques pour différencier les comportements d'exploration. Ces algorithmes ont l'avantage d'épargner la classification manuelle (et chronophage) des comportements d'exploration par les expérimentateurs. Cependant pour un même jeu de données, tous les algorithmes ne classifient pas de la même manière les comportements du regard (ANDERSSON et al., 2017).

Un algorithme basé sur la vitesse du regard (I-VT : Identification-Velocity Threshold) a été utilisé pour classifier les comportements du regard des participants dans cette étude (voir SALVUCCI et GOLDBERG, 2000 pour le pseudo-code). Les données brutes enregistrées étaient les 3 coordonnées de la direction du regard dans l'espace virtuel. Cependant, la direction du regard par rapport à l'axe vertical Y était en moyenne de -1.80° avec un écart type de 1.73° . En d'autres termes, les participants ont regardé constamment au niveau des yeux. Par conséquent, la direction du regard sur l'axe Y n'a pas été prise en compte pour la classification des comportements du regard. La direction du regard sur le plan XZ, qui correspond au plan horizontal du terrain de football virtuel, a été utilisée pour calculer l'angle de la direction du regard (en degrés) autour de l'axe vertical par rapport à l'axe longitudinal du terrain virtuel (figure 4.6, ligne orange).

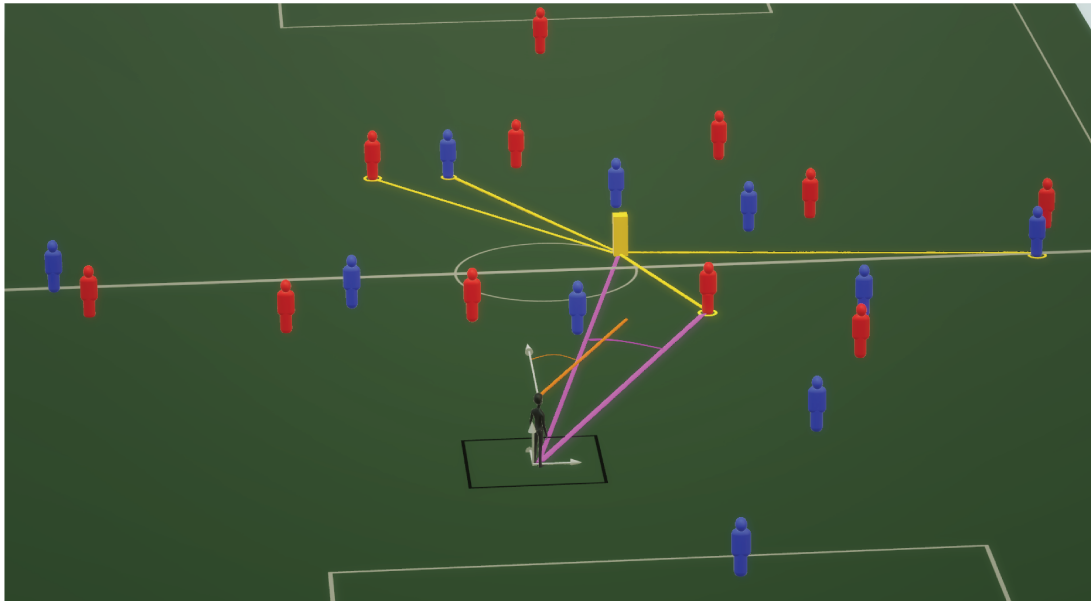


FIGURE 4.6 – **Schéma de la configuration expérimentale dans l'environnement virtuel.** L'humanoïde noir représente un participant, et les mannequins rouges et bleus représentent les joueurs virtuels. Par rapport au schéma, seuls le terrain et les joueurs virtuels étaient visibles pour le participant pendant l'expérience. Les lignes noires représentent l'espace de mouvement autorisé pour le participant, et les flèches grises représentent les axes de référence de l'espace virtuel 3D. Un axe correspond à la longueur du terrain, un autre à la largeur du terrain, et le dernier à l'axe vertical. La ligne orange correspond à la direction du regard du participant. L'angle du regard, illustré par l'arc de cercle orange, est calculé comme l'angle entre le vecteur de la direction du regard et l'axe longitudinal du terrain. La brique jaune représente le centroïde des joueurs-cibles, calculé comme l'emplacement moyen des joueurs-cibles. Pour chaque joueur-cible, un angle d'excentricité est calculé, par exemple, illustré par l'arc de cercle rose, comme l'angle entre le vecteur du participant vers une cible et le vecteur du participant vers le centroïde. Ces angles sont utilisés pour classer les joueurs-cibles en fonction de leur distance au centroïde. Sur le schéma, le joueur-cible indiqué est le plus proche du centroïde (R1).

Pour déterminer le seuil de vitesse utilisé pour classifier les comportements d'exploration, plusieurs valeurs (de 40 à 100 °/s) ont préalablement été testées comme seuil de vitesse sur 10 essais tirés au sort. Les classifications obtenues ont été comparées à une classification manuelle réalisée par deux investigateurs de l'étude. Le nombre de fixations, la durée de fixation, le nombre de saccades et l'amplitude des saccades donnés par les classifications automatique et manuelle ont été utilisés comme paramètres de comparaison. Au final, le seuil de vélocité de 60°/s a été retenu pour l'ensemble de la classification du jeu de données du regard. Pour la mesure de concordance entre échantillons (ANDERSSON

et al., 2017), une fiabilité élevée est observée avec l'investigateur 1 pour classer les fixations (Kappa de Cohen=0.88 et score F1=0.98) et les saccades (Kappa de Cohen=0.89, score F1=0.90). Une fiabilité correcte avec l'investigateur 2 pour classer les fixations (Kappa de Cohen=0.73, F1-score=0.96) et les saccades (Kappa de Cohen=0.83, F1-score=0.85) est observée. Par conséquent, la classification renvoyée par l'algorithme I-VT est supposée, avec une confiance raisonnable, être similaire à une classification humaine (ANDERSSON et al., 2017).

4.2.2.5 Activité du regard

L'activité du regard est examinée sous un ensemble de variables calculées sur chacun des 30 essais :

- le taux de recherche visuel : calculé comme le nombre de fixations divisé par la durée moyenne sur un essai. Un taux de recherche élevé correspond à de nombreuses fixations courtes, tandis qu'un taux de recherche faible correspond à quelques fixations de longue durée (HARRIS et al., 2021b).
- l'amplitude des saccades (degrés) : calculée comme la distance angulaire entre l'emplacement initial et l'emplacement final de chaque saccade.
- La variabilité de l'exploration du regard (degrés) : calculée comme l'erreur RMS entre la direction du regard et la direction du centroïde. La direction du centroïde est calculée comme la direction moyenne entre les joueurs-cibles. Dans la figure 4.6, le centroïde est représenté par la brique jaune au centre des quatre joueurs-cibles. Cette variable indique la largeur de la zone balayée par le regard autour du centroïde qui est le point théorique minimisant l'excentricité perçue de chaque joueur-cible (HYÖNÄ et al., 2019)
- Le temps de séjour (secondes) sur chaque aire d'intérêt (AOI : Area Of Interest) : calculé comme la durée cumulée de fixation sur chaque AOI. Les six AOIs identifiées sont les quatre joueurs-cibles, le centroïde et « Other » qui correspond à tout autre espace ou objet dans l'environnement virtuel. Les joueurs-cibles sont classés en fonction de leur proximité moyenne du centroïde (par exemple, la ligne violette de la figure 4.6). Par conséquent, les AOIs R1, R2, R3 et R4 correspondent respectivement au joueur-cible le plus proche du centroïde (rang 1), au deuxième joueur-cible le plus proche du centroïde (rang 2), au troisième joueur-cible le plus proche du

centroïde (rang 3) et au joueur-cible le plus éloigné du centroïde (rang 4). Une AOI est identifiée comme fixée lorsque la distance entre la direction du regard et la direction perçue de l'AOI est inférieure à un seuil de 1.5° pendant la fixation. L'AOI « Other » est identifiée comme fixée si le regard ne correspond à aucun des autres AOIs.

4.2.2.6 Caractéristiques spatiales des situations

Sur la base d'une procédure K-means, les 30 essais sont regroupés en 3 clusters en fonction de la dispersion des joueurs-cibles et de la proximité des perturbateurs près des joueurs-cibles (Fig. 4.7). La dispersion des joueurs-cibles dans un essai est calculée comme la moyenne de l'écart-type de l'angle perçu des quatre joueurs-cibles. La proximité des perturbateurs dans un essai est calculée comme la distance moyenne qui sépare chaque cible du plus proche perturbateur. Enfin, pour chaque essai, un score de situation est calculé comme le nombre moyen de joueurs-cibles suivis avec succès par les participants. Il fournit un indicateur de difficulté de la tâche de suivi visuel dans une situation.

Le cluster #1 est composé de 8 situations (les points violets sur la figure 4.7) avec une haute dispersion spatiale des joueurs-cibles et une distance des plus proches distracteurs faible à modérée. Le cluster #2 est composé de 8 situations (points bleus sur la figure 4.7), avec une dispersion spatiale des joueurs-cibles faible à modérée et une distance éloignée des plus proches distracteurs. Enfin, le cluster #3 est composé de 14 situations (points jaunes sur la figure 4.7), avec une faible dispersion spatiale moyenne des joueurs-cibles et une faible distance moyenne avec les plus proches distracteurs.

4.2.2.7 Analyse de données

Une régression par modèle linéaire mixte (LMM : Linear Mixed Model) est utilisée pour observer l'effet inter-sujet du groupe de participants, l'effet intra-sujet de la condition expérimentale et leur effet d'interaction sur la performance de suivi visuel. Des LMM successifs sont exécutés sur la recherche visuelle, l'amplitude des saccades et la variabilité de l'exploration du regard pour observer l'effet intra-sujet du cluster de situations, l'effet inter-sujet du groupe de participants et leur effet d'interaction. Un LMM est exécuté sur le temps de séjour pour observer les effets du cluster de situations, du groupe de participants, de l'aire d'intérêt (AOI) et de leurs interactions. Pour chaque modèle, un point d'interception aléatoire est défini par rapport aux mesures répétées de chaque par-

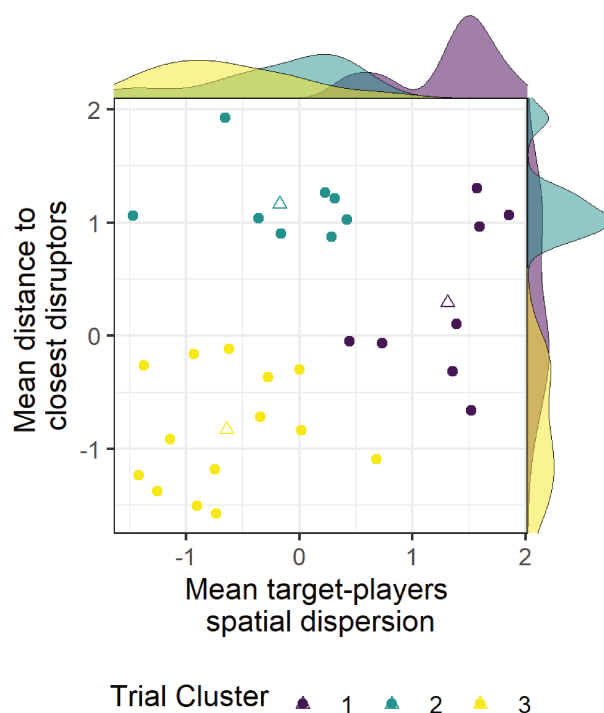


FIGURE 4.7 – **Regroupement des situations en trois clusters (violet, bleu et jaune, respectivement)**. Le clustering est basé sur la dispersion spatiale moyenne des joueurs-cibles (axe des abscisses) et la distance moyenne qui séparent les joueurs-cibles des plus proches perturbateurs (axe des ordonné). Les deux variables sont centrées-réduites. Les triangles représentent la valeur moyenne de chaque cluster.

ticipant. Des comparaisons par paires avec ajustement de Tukey sont effectuées en tests post-hoc lorsque des effets principaux significatifs sont observés. Les valeurs aberrantes sont identifiées et éliminées lorsqu'elles sont supérieures à 3 écarts-types de la moyenne. La normalité et l'homoscédasticité des résidus sont inspectées à l'aide de diagrammes diagnostiques. La variabilité de l'exploration du regard est transformée par une fonction logarithme en raison de l'hétéroscédasticité importante des données originales. Le temps de séjour est transformé par une fonction racine carrée en raison de la non-normalité substantielle des données d'origine. L'analyse statistique est effectuée sur R.

Occasionnellement, les participants ont involontairement mis fin à un essai sans avoir sélectionné quatre joueurs virtuels. Ces essais sont considérés comme invalides et sont retirés de l'analyse des données. À cet égard, parmi les 30 essais des 31 participants, 14 essais invalides sont retirés pour l'analyse de la performance de suivi visuel (soit 1.5 % des données globales). En ce qui concerne l'analyse de l'activité du regard, un unique essai est supprimé en plus parce qu'aucune saccade n'est détectée. Après une inspection visuelle de cet essai, il est supposé que trop de bruit dans le signal ne permette pas une classification fiable du comportement du regard dans cet essai. Par conséquent, 1.6 % de l'ensemble des données est écarté pour l'analyse de l'activité du regard.

4.2.3 Résultats

4.2.3.1 Performance de suivi visuel

Les performances des groupes par condition sont présentées dans la figure 4.8. Le LMM révèle un effet significatif du groupe de participants ($F(1,29)=21.510$, $p<0.001$, $\eta_p^2=0.43$), avec une performance de suivi visuel plus élevée chez les joueurs de football (0.804 ± 0.072) que chez les non-pratiquants (0.703 ± 0.060), mais aucun effet significatif de la condition ($F(1,29)=0.037$, $p=0.848$, $\eta_p^2=0.01$) et aucun effet d'interaction significatif ($F(1,29)=1.369$, $p=0.252$, $\eta_p^2=0.05$).

4.2.3.2 Activité du regard

Recherche visuelle

Le LMM révèle un effet significatif du cluster de situations ($F(2,58)=26.26$, $p<0.001$, $\eta_p^2=0.48$), mais aucun effet significatif du groupe de participants ($F(1,29)=2.656$, $p=0.114$, $\eta_p^2=0.08$), et aucun effet d'interaction significatif ($F(2,58)=1.076$, $p=0.348$, $\eta_p^2=0.04$) sur

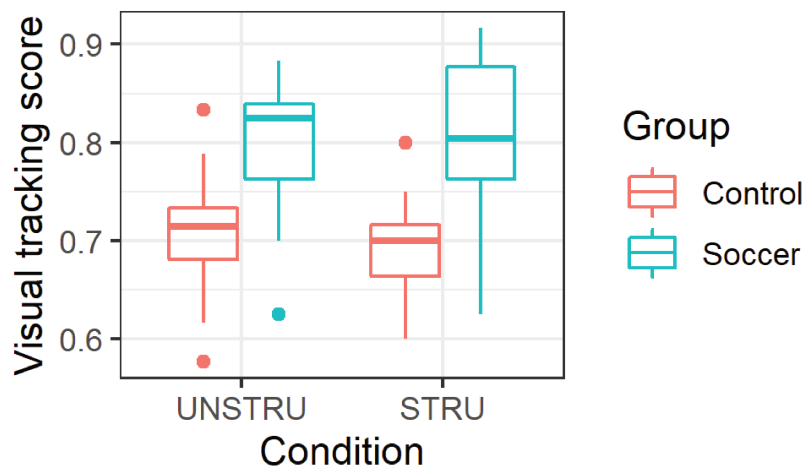


FIGURE 4.8 – Performance du suivi visuel par groupe dans les deux conditions expérimentales.

le taux de recherche visuelle moyen. L'analyse post-hoc révèle (Fig. 4.9-A) un taux de recherche plus faible ($p < 0.001$) dans le cluster #2 (127.123 ± 67.201) que dans le cluster #1 (166.960 ± 86.212), un taux de recherche plus faible ($p < 0.001$) dans le cluster #3 (110.864 ± 54.288) que dans le cluster #1, mais aucune différence entre le cluster #2 et le cluster #3 ($p = 0.104$).

Amplitude des saccades

Le LMM ne révèle aucun effet significatif du groupe de participants ($F(1,29) = 2.004$, $p = 0.167$, $\eta_p^2 = 0.06$), mais elle montre un effet significatif du cluster de situations ($F(2,58) = 117.163$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.80$), et un effet d'interaction significatif entre le cluster de situations et le groupe de participants ($F(2,58) = 3.731$, $p = 0.030$, $\eta_p^2 = 0.11$) sur l'amplitude moyenne des saccades.

L'analyse post-hoc révèle (Fig. 4.9-B) une amplitude de saccade plus élevée ($p = 0.016$) chez les joueurs de football (13.085 ± 2.697 degrés) que chez les non-pratiquants (11.488 ± 1.829 degrés) pour les situations du cluster #1, mais aucune différence ($p = 0.393$) entre les joueurs de football (9.852 ± 1.746 degrés) et les non pratiquants (9.302 ± 1.384 degrés) pour les situations du cluster #2 ($p = 0.393$) et aucune différence entre les joueurs de football (8.543 ± 1.231 degrés) et les non pratiquants (8.230 ± 1.285 degrés) pour les situations du cluster #3 ($p = 0.701$). De plus, l'analyse post-hoc révèle pour les deux groupes une am-

plitude de saccade plus faible ($p < 0.001$) dans les situations du cluster #2 (9.586 ± 2.420 degrés) que dans celles du cluster #1 (12.312 ± 1.580 degrés), une amplitude de saccade plus faible ($p < 0.001$) dans les situations du cluster #3 (8.423 ± 1.242 degrés) que dans celles du cluster #1 et une amplitude de saccade plus faible dans le cluster #3 que dans le cluster #2 ($p < 0.05$).

Variabilité de l'exploration du regard

Le LMM révèle un effet significatif du cluster de situations ($F(2,58)=839.330$, $p < 0.001$, $\eta_p^2=0.97$), mais aucun effet significatif du groupe de participants ($F(1,29)=2.124$, $p=0.156$, $\eta_p^2=0.07$) et aucun effet d'interaction significatif ($F(2,58)=0.949$, $p=0.393$, $\eta_p^2=0.03$) sur la variabilité de l'exploration du regard. L'analyse post-hoc révèle (Fig. 4.9-C) une variabilité d'exploration du regard plus faible ($p < 0.001$) dans le cluster #2 (10.868 ± 1.373 degrés) que dans le cluster #1 (18.013 ± 2.330 degrés), une variabilité d'exploration du regard plus faible dans le cluster #3 (9.391 ± 1.012 degrés) que dans les clusters #1 et #2 ($ps < 0.001$).

Temps de séjour par AOI

Le LMM révèle un effet significatif du cluster de situations ($F(2, 521)=7.792$, $p < 0.001$, $\eta_p^2=0.03$), un effet significatif de l'AOI ($F(5,521)=628.252$, $p < 0.001$, $\eta_p^2=0.86$), un effet d'interaction significatif entre le groupe de participants et l'AOI ($F(5,521)=9.545$, $p < 0.001$, $\eta_p^2=0.08$), un effet d'interaction significatif entre le cluster de situations et l'AOI ($F(10,521)=21.362$, $p < 0.001$, $\eta_p^2=0.29$), mais pas d'effet du groupe de participants ($F(1,521)=1.388$, $p=0.239$, $\eta_p^2 < 0.01$), pas d'effet d'interaction entre le groupe de participants et le cluster de situations ($F(2,521)=0.022$, $p=0.978$, $\eta_p^2 < 0.01$), et pas d'effet d'interaction à trois voies entre le groupe de participants, le cluster de situations et l'AOI ($F(10,521)=1.805$, $p=0.057$, $\eta_p^2=0.03$) sur le temps de séjour.

Voir en Annexe 6.6.2 pour les valeurs mesurées des temps de séjour par groupe, AOI et cluster (Tab. A3) et pour les résultats des tests post-hoc sur les interactions entre les facteurs cluster de situations et AOI (Tab. A4). Les résultats des tests post-hoc liés aux interactions entre le facteurs AOI et groupe de participants sont résumés dans le tableau 4.3 et indiqués dans la figure 4.6-D.

| AOI | Comparaison | p.value |
|---------------|---------------------------|----------------|
| Centroid | Control = Soccer | 0.606 |
| Other | Control > Soccer | 0.001 |
| R1 | Control < Soccer | <.0001 |
| R2 | Control < Soccer | 0.002 |
| R3 | Control = Soccer | 0.293 |
| R4 | Control = Soccer | 0.175 |
| Groupe | Comparaison | p.value |
| Control | Other > R1 > R2 | <.001 et 0.007 |
| Control | R2 = R3 | 0.504 |
| Control | R3 > R4 | <.0001 |
| Control | R4 = centroid | 1.000 |
| Soccer | Other > R1 > R2 > R3 > R4 | <.001 |
| Soccer | R4 = centroid | 0.305 |

TABLE 4.3 – **Résultats des tests post-hoc sur les effets d'interaction entre les facteurs groupes et AOI.** La première moitié du tableau montre les différences entre les groupes pour chaque AOI et la seconde moitié montre les différences entre les AOIs pour chaque groupe.

Score de suivi par cluster

Le LMM révèle un effet significatif du cluster de situations ($F(2,58)=26.520$, $p<0.001$, $\eta_p^2=0.48$), un effet fixe significatif du groupe ($F(1,29)=19.051$, $p<0.001$, $\eta_p^2=0.40$), mais aucun effet d'interaction significatif entre ces deux facteurs ($F(2,58)=0.844$, $p=0.435$, $\eta_p^2=0.03$) sur le score de suivi visuel moyen. L'analyse post-hoc révèle (Fig. 4.9-E) un score de suivi visuel plus faible ($p<0.001$) dans le cluster #1 (2.804 ± 0.392) que dans le cluster #2 (3.242 ± 0.339), un score de suivi visuel plus faible ($p=0.032$) dans le cluster #1 que dans le cluster #3 (2.964 ± 0.430), et un score de suivi visuel plus élevé dans le cluster #2 que dans le cluster #3 ($p<0.001$).

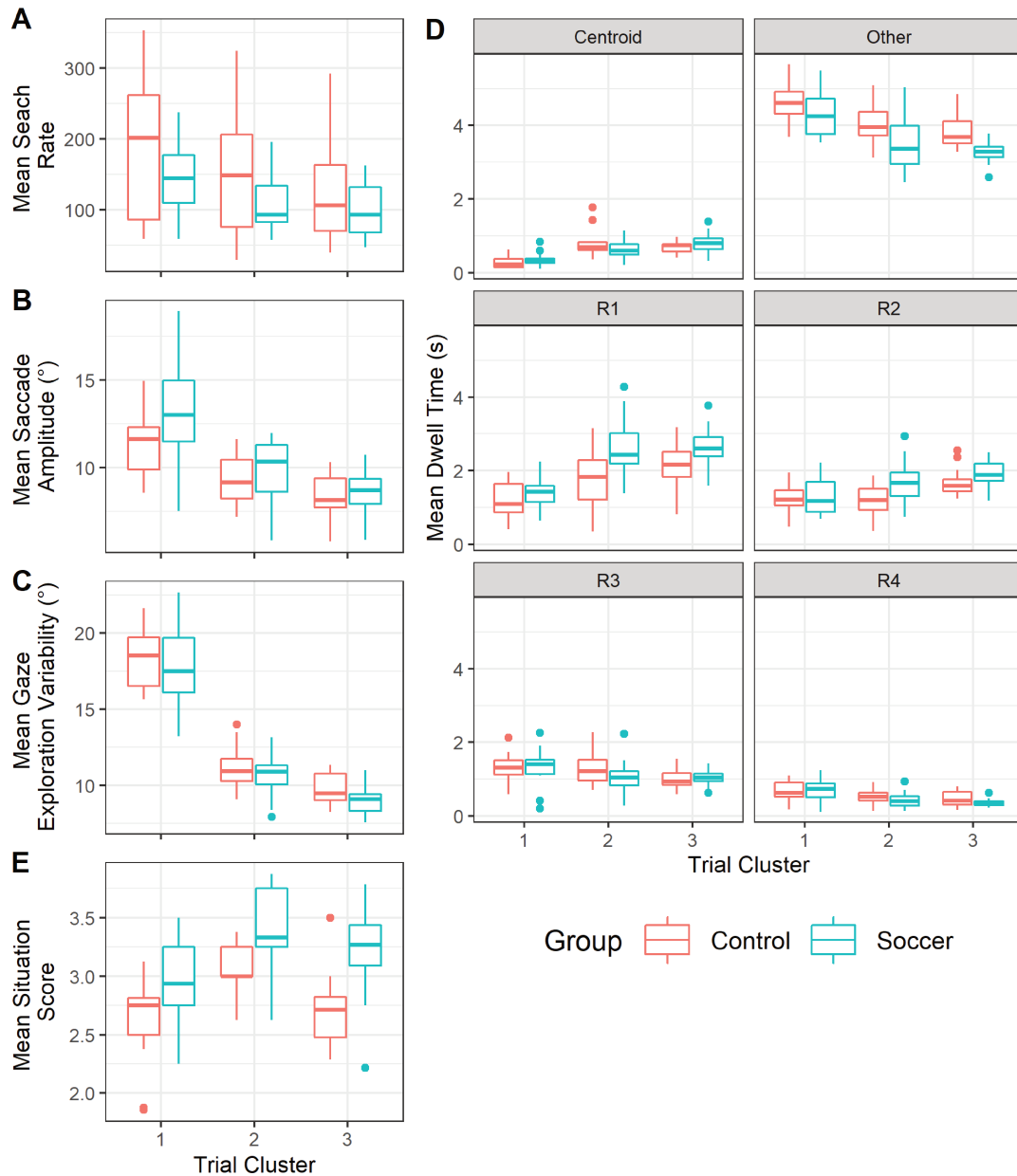


FIGURE 4.9 – Variables d'exploration visuelle par groupe (Soccer en bleu et Contrôle en rouge) et par cluster (1, 2 et 3 respectivement). (A) Taux de recherche visuelle moyen, (B) Amplitude moyenne des saccades, (C) Variabilité moyenne de l'exploration du regard, (D) Temps de séjour moyen par AOI, et (E) Score moyen de suivi visuel.

4.2.4 Discussion

L'étude examine d'une part l'influence des trajectoires réelles sur la performance de suivi visuel et d'autre part la différence d'activité du regard entre les joueurs de football et les non-pratiquants.

4.2.4.1 Performance de suivi visuel

Conformément à la littérature, la performance de suivi visuel est plus élevée chez les joueurs de football que chez les non-pratiquants, indépendamment du type de déplacement utilisé (FAUBERT, 2013; MARTÍN et al., 2017; QIU et al., 2018; HARRIS et al., 2020b; JIN et al., 2020). Ces résultats soutiennent l'idée que les joueurs de football ont des capacités perceptivo-cognitives fondamentales plus développées (VOSS et al., 2010), comme l'attention visuelle (QIU et al., 2018; JIN et al., 2020) ou la mémoire de travail (HARRIS et al., 2020b). Ces différences sont supposées liées à la pratique régulière d'une activité avec de fortes contraintes attentionnelles (GREEN & BAVELIER, 2006).

Cependant, comme pour l'étude 1, les résultats ne confirment pas l'hypothèse selon laquelle les joueurs de football bénéficient de leurs connaissances spécifiques pour suivre plusieurs joueurs virtuels. Il est probable que les conditions proposées ne nécessitent pas l'utilisation de connaissances spécifiques. Une autre explication de ces résultats serait que la contextualisation des mouvements d'objets à un domaine d'expertise n'influence tout simplement pas la capacité de suivi visuel. L'avantage des joueurs de football dans cette tâche de suivi visuel peut être principalement lié aux mécanismes qui sous-tendent l'acquisition d'informations sur la dynamique d'une scène visuelle, comme l'attention spatiale et la mémoire de travail (EHMANN et al., 2021), indépendamment de son contenu.

4.2.4.2 Activité du regard

L'analyse proposée regroupe les situations selon la distribution spatiale des joueurs virtuels en trois clusters. Comme attendu, une partie de la variabilité de l'activité du regard est expliquée par les caractéristiques spatiales des situations présentées. La figure 4.10 montre l'angle du regard des participants (en bleu pour les joueurs de football et en orange pour les non-pratiquants) pendant l'essai le plus typique de chacun des trois clusters, *i.e.* l'essai le plus proche du centre de chaque cluster. La dispersion élevée des joueurs-cibles (lignes noires en pointillés dans chaque graphique de la figure 4.10) induit naturellement des saccades et une exploration visuelle plus importantes chez les partici-

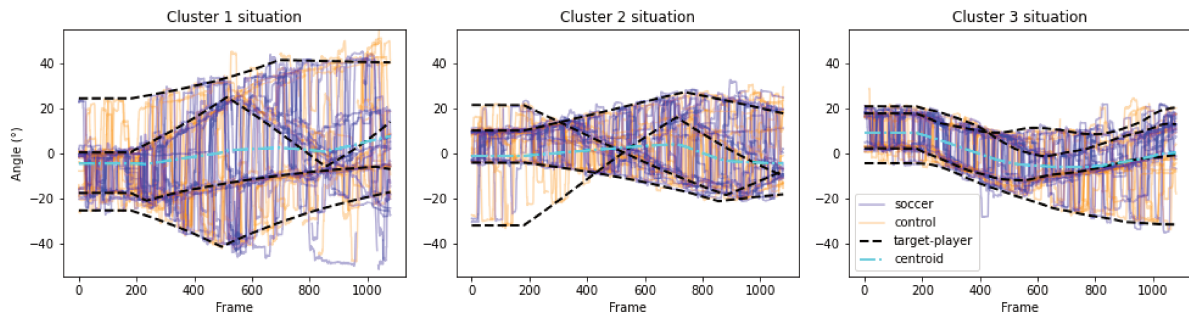


FIGURE 4.10 – **Activité du regard de tous les joueurs de football (lignes bleues) et de tous les non-pratiquants (lignes oranges).** Les trois situations correspondant au cluster #1 (tracé de gauche), au cluster #2 (tracé central) et au cluster #3 (tracé de droite), respectivement. Les lignes noires en pointillés correspondent à la direction perçue d'un joueur-cible et les lignes cyans en pointillés correspondent à la direction relative du centroïde.

pants lors des situations du cluster #3 (figure 4.10, graphique de gauche). Les résultats montrent également un taux de recherche et un temps de séjour sur l'AOI « Other » plus élevés pour les situations du cluster #1, qui sont les plus difficiles à réussir (Fig. 4.6-E). L'importante dispersion des joueurs-cibles ne permet probablement pas l'utilisation d'une stratégie d'ancrage du regard avec une acuité visuelle suffisante pour surveiller les joueurs-cibles en périphérie. La répétition de longues inhibitions visuelles liées aux saccades affecte probablement la précision du suivi visuel dans les situations du cluster #1 (VATER et al., 2017a). À l'inverse, les situations où la dispersion des joueurs-cibles est faible (clusters #2 et #3, respectivement au centre et à droite de la figure 4.10) induisent un taux de recherche plus faible, une amplitude de saccade plus faible, une variabilité d'exploration du regard plus faible et un temps de séjour prolongé sur les aires d'intérêt R1 et R2. L'utilisation d'une stratégie d'ancrage semble plus marquée dans ces situations que celle du cluster #1 (VATER et al., 2019). De plus, le score de suivi visuel du cluster #3 est plus faible que celui du cluster #2, ce qui confirme l'effet négatif de la densité sur la performance du suivi visuel (VATER et al., 2017a). La densité augmente la possibilité de confondre un joueur-cible avec un perturbateur. Le coût des saccades augmente aussi probablement si plusieurs des quatre joueurs-cibles sont entourés par des perturbateurs proches, ce qui peut induire une réduction supplémentaire de l'amplitude des saccades et de l'exploration globale du regard dans les situations du cluster #3 par rapport à celles du cluster #2 (VATER et al., 2019).

Le taux de recherche ne diffère pas entre les joueurs de football et les non-pratiquants, ce qui est conforme aux résultats de HARRIS et al. (2020b). Cependant, les comportements d'exploration des joueurs de football diffèrent de ceux des non-pratiquants sur deux points. Premièrement, dans les situations avec une grande dispersion des joueurs-cibles (cluster #1), les joueurs de football effectuent des saccades de plus grande amplitude que les non-pratiquants. L'augmentation de l'amplitude des saccades dans l'exploration visuelle semble résulter de la pratique régulière d'une activité nécessitant la perception d'indices dispersés dans l'environnement (HARRIS et al., 2021b). Une amélioration de la sensibilité en vision périphérique permettrait de réaliser de plus larges saccades pour rapidement et précisément rapprocher le regard d'une cible excentrée (HARRIS et al., 2021b). Des études antérieures ont rapporté que les joueurs de football sont sensibles aux indices visuels situés plus loin dans la largeur de la vision périphérique que les non-pratiquants, probablement en raison d'une pratique régulière nécessitant l'allocation de l'attention sur l'axe horizontal de la vision périphérique (HÜTTERMANN et al., 2014; HÜTTERMANN & MEMMERT, 2018). C'est un avantage dont les joueurs de football peuvent avoir bénéficié pour réaliser de plus larges saccades. Pour confirmer cette hypothèse, des investigations sont nécessaires pour mesurer l'association entre la dimension de la fenêtre d'attention d'un individu et l'amplitude des saccades réalisées face aux situations avec des joueurs-cibles dispersés. De plus, ces investigations permettraient de voir si la performance de suivi visuel est associée à la dimension de la fenêtre d'attention et si, dans le sens inverse, la fenêtre d'attention peut s'élargir suite à un entraînement basé sur la tâche de suivi visuel (HÜTTERMANN & MEMMERT, 2018).

Deuxièmement, par rapport aux non-pratiquants, les joueurs de football passent plus de temps à fixer les joueurs-cibles centraux (R1 et R2) et moins de temps à fixer l'AOI « Other ». Au final, pour tous les participants, très peu de fixations du regard sont dirigées vers le centroïde alors que « Other » est l'AOI la plus fixée. À la place du centroïde, les joueurs-cibles les plus proches du centre semblent être utilisés comme point d'ancrage ou pivot visuel pour localiser le regard à un emplacement optimisé entre tous les joueurs-cibles (ZELINSKY & NEIDER, 2008; OKSAMA & HYÖNÄ, 2016; VATER et al., 2019). Étant donné l'importance de « Other », il est fort probable que le pivot visuel ne soit pas directement sur un joueur-cible spécifique mais plutôt sur un emplacement à proximité de celui-ci (OKSAMA & HYÖNÄ, 2016). Ce raccourci permettrait d'éviter le coût mental associé au calcul continu du centroïde entre les joueurs-cibles (FEHD & SEIFFERT, 2010). Les résultats suggèrent que les joueurs de football exécutent cette stratégie plus

fréquemment que les non-pratiquants. Pour voir si c'est une stratégie qui se développe avec la pratique du football, des études longitudinales permettraient de voir si les aires d'intérêt privilégiées évoluent au cours de l'apprentissage.

Il convient de souligner les limites de ces résultats concernant l'activité du regard. Premièrement, le seuil spatial utilisé pour déterminer si une AOI est fixée ou non (1.5°) est choisi en fonction de l'erreur d'enregistrement de l'appareil (1.1°) et d'une marge liée à l'épaisseur des joueurs virtuels (0.4°). La variable du temps de séjour pourrait varier avec une autre valeur seuil. Ces résultats doivent être confirmés par une autre méthode d'identification des objets fixés dans l'environnement virtuel. Au lieu d'utiliser un calcul a posteriori, il est possible d'enregistrer à chaque pas de temps quel objet est fixé à l'aide d'un rayon projeté le long du vecteur du regard dans l'environnement virtuel. Deuxièmement, par souci de simplicité, seules deux variables sont utilisées pour regrouper les situations en clusters, ce qui peut avoir conservé une certaine variabilité entre les situations au sein d'un même cluster. D'autres caractéristiques situationnelles, comme la vitesse (HARRIS et al., 2020b), doivent être prises en compte à l'avenir pour regrouper les situations. Au moins, il serait intéressant de compléter cette analyse en comparant l'activité du regard avec des situations présélectionnées en fonction de la disparité des joueurs-cibles dans l'espace et de la densité des perturbateurs proches.

4.2.5 Conclusion

D'une part, les joueurs de football montrent une meilleure capacité à suivre des joueurs virtuels en RV que des non-pratiquants. Cependant, l'utilisation des trajectoires réelles n'a une nouvelle fois pas eu d'incidence sur les écarts de performances entre pratiquants et non pratiquants. D'autre part, il est observé que l'activité du regard des participants varie en fonction de la distribution spatiale des joueurs virtuels. De plus, l'activité du regard varie entre les joueurs de football et les non-pratiquants sous certains aspects. De nouvelles investigations sont à mener pour déterminer de quelle manière ces différences dans l'activité du regard soutiennent la meilleure performance de suivi visuel des joueurs de football par rapport à des non-pratiquants.

INFLUENCE DE LA DOUBLE-TÂCHE SUR L'EFFET LIÉ NIVEAU DE COMPÉTITION

5.1 Étude 3 - Multiple-Players-Tracking lors de la réception d'un ballon en réalité virtuelle : interférence d'une double-tâche cognitivo-motrice sur la performance de suivi visuel

Comme mentionné précédemment (section 1.3.1.4), les joueurs de football doivent percevoir leur environnement lorsqu'ils se déplacent et interagissent avec le ballon. La double-tâche est utilisée en laboratoire pour reproduire les contraintes multitâches de la vie réelle (GABBETT et al., 2011). De plus, la double-tâche permet d'accroître les écarts inter-individuels liés à l'âge (POTHIER et al., 2015), à une déficience intellectuelle (VAN BIESEN et al., 2018), ou à la pratique sportive (ZWIERKO et al., 2022) sur la performance de suivi visuel. Cependant, encore aucune étude ne s'est intéressée à l'effet de l'expertise sportive sur la performance de suivi visuel en double-tâche. À cet égard, la tâche de Multiple-Players-Tracking est adaptée de façon à contextualiser l'évaluation dans des situations de passe en retrait, permettant à l'observateur d'intercepter un ballon virtuel pendant le suivi visuel des joueurs virtuels. Cette modalité vise à mimer le besoin des joueurs de football de percevoir leurs partenaires et adversaires avant et pendant la réception du ballon. Dans un CAVE, cette étude compare la performance de suivi visuel de joueurs de niveau national ou régional. Un plus grand écart de performance de suivi visuel entre les groupes est attendu lorsqu'un ballon doit être intercepté par rapport à la réalisation de la tâche de suivi visuel de manière isolée.

5.1.1 Méthodologie

5.1.1.1 Participants

Vingt-quatre joueurs de football masculins (26 ± 8 ans) ayant une vision normale ou normale avec correction ont participé à cette étude. Un groupe haut-niveau (High-skill : HS) est composé de 12 joueurs évoluant en compétitions nationales. Un groupe moins haut-niveau (Lower-skill : LS) est composé de 12 joueurs évoluant en compétitions régionales ou départementales. Le consentement écrit a été obtenu avant la participation. Le protocole expérimental et la procédure de collecte des données ont été validés au préalable par un comité d'éthique national (IRB00012476-2021-16-04-102).

5.1.1.2 Matériels

Un CAVE de 12m x 4m x 4m a été utilisé pour afficher l'environnement virtuel immersif. Les projections sur les murs frontal et latéral droit et sur le sol couvraient la totalité du champ visuel d'un participant (Fig. 5.1). Un système Vicon à 16 caméras a été utilisé pour capturer les mouvements des lunettes, d'un contrôleur manuel et de clusters de marqueurs passifs sur les chevilles de l'utilisateur. Les clusters de marqueurs passifs ont été utilisés pour colocaliser les pieds de l'utilisateur dans l'environnement virtuel afin de mener la tâche d'interception (voir section 5.1.1.3). La fréquence d'affichage moyenne était d'environ 45 Hz.

5.1.1.3 Conditions expérimentales

Quatre conditions expérimentales ont impliqué la réalisation d'une tâche de suivi visuel, d'une tâche d'interception, ou des deux.

La tâche de suivi visuel : 3 joueurs-cibles devaient être suivis (2 partenaires et un adversaire, ou inversement). Voir la section 3.1 pour un rappel du déroulé de la tâche. *N.B.* : un joueur-cible était situé dans chacun des 3 couloirs imaginaires sur la largeur du terrain au début et à la fin de l'essai pour refléter la difficulté de suivre des objets dispersés dans l'espace (les participants n'étaient pas au courant de cette information). *La tâche d'interception* : au cours d'un essai, un partenaire virtuel a réalisé une passe vers le participant qui devait intercepter la trajectoire du ballon virtuel avec l'un de ses pieds. Le ballon virtuel s'arrêtait si une collision était détectée avec l'objet virtuel co-localisé représentant le pied dans l'environnement virtuel. La direction de la passe était ajustée

5.1. Étude 3 - Multiple-Players-Tracking lors de la réception d'un ballon en réalité virtuelle :
interférence d'une double-tâche cognitivo-motrice sur la performance de suivi visuel



FIGURE 5.1 – Présentation de la tâche de suivi visuel dans l'environnement virtuel projeté selon le point de vue d'un participant dans le CAVE. Le participant a la possibilité de se déplacer sur toute la surface de ce CAVE (12x4m) mais doit démarrer chaque essai à partir du disque blanc indiqué au sol.

en fonction de la position initiale du participant dans l'environnement virtuel. Si aucun mouvement n'était réalisé par le participant, le ballon passait à sa gauche ou à sa droite (entre 0.8 et 1.2 m) respectivement pour la moitié des situations.

Les 4 conditions expérimentales sont décrites de la manière suivante :

- *Condition double-tâche avec passe (DT-P)* : le suivi visuel et l'interception étaient tous deux demandés au cours d'un même essai.
- *Condition double-tâche sans passe (DT-N)* : la trajectoire du ballon a été modifiée de façon à ce qu'aucune passe en direction du participant ne se produise. À la place, le ballon était redirigé vers un autre coéquipier virtuel. Seul le suivi visuel pouvait donc être complété. À chaque début d'essai, le participant n'était pas informé de la venue ou non d'une passe.

- *Condition simple-tâche de suivi visuel (ST-VT)* : le ballon virtuel était complètement retiré de l'environnement et seule la tâche de suivi visuel était demandée.
- *Condition simple-tâche d'interception (ST-I)* : aucun joueur-cible n'était indiqué et seule l'interception du ballon devait être réalisée.

5.1.1.4 Procédure

La collecte des données a eu lieu sur la plateforme *Immermove* du laboratoire M2S de l'Université Rennes 2. Les participants ont d'abord effectué 4 essais d'entraînement pour se familiariser avec la tâche de suivi visuel et la tâche d'interception. Ensuite, les participants ont effectué 48 essais (12 situations dans les 4 conditions) dans un ordre aléatoire. Pour éviter que les participants ne reconnaissent une même situation de jeu, les 12 situations ont été éditées dans les conditions DT-N et ST-I de manière à inverser la position des joueurs virtuels sur la largeur du terrain. La durée totale d'évaluation était de 30 minutes environ. À l'issue de l'expérimentation, les participants ont rempli un questionnaire IPQ pour recueillir leur sentiment de présence¹.

5.1.1.5 Analyse des données

L'objectif principal de cette étude est d'observer la diminution de la performance de suivi visuel entre ST-VT, DT-P et DT-N. La comparaison entre ST-VT et DT-P vise à mettre en évidence l'interférence dans le suivi visuel induite par la réalisation de l'interception du ballon. Les comparaisons entre ST-VT et DT-N, puis entre DT-N et DT-P visent à déterminer dans quelle mesure la simple surveillance du ballon (sans action d'interception) génère une interférence dans la performance de suivi visuel. *N.B.* : ST-I était une condition de contrôle pour s'assurer que chaque participant était bien capable d'intercepter avec succès un ballon virtuel. La performance sur la tâche d'interception n'est ainsi pas analysée.

L'analyse statistique est effectuée sur R. Une ANOVA mixte est utilisée pour observer l'effet inter-sujet du groupe de participants, l'effet intra-sujet de la condition expérimentale et leur effet d'interaction sur la performance de suivi visuel. Des t-tests avec correction de Bonferroni sont effectués pour l'analyse post-hoc. Deux valeurs aberrantes (1 dans le groupe LS et 1 dans le groupe HS) sont écartées de l'analyse des données sur la base d'une

1. <http://www.igroup.org/pq/ipq/download.php#French>

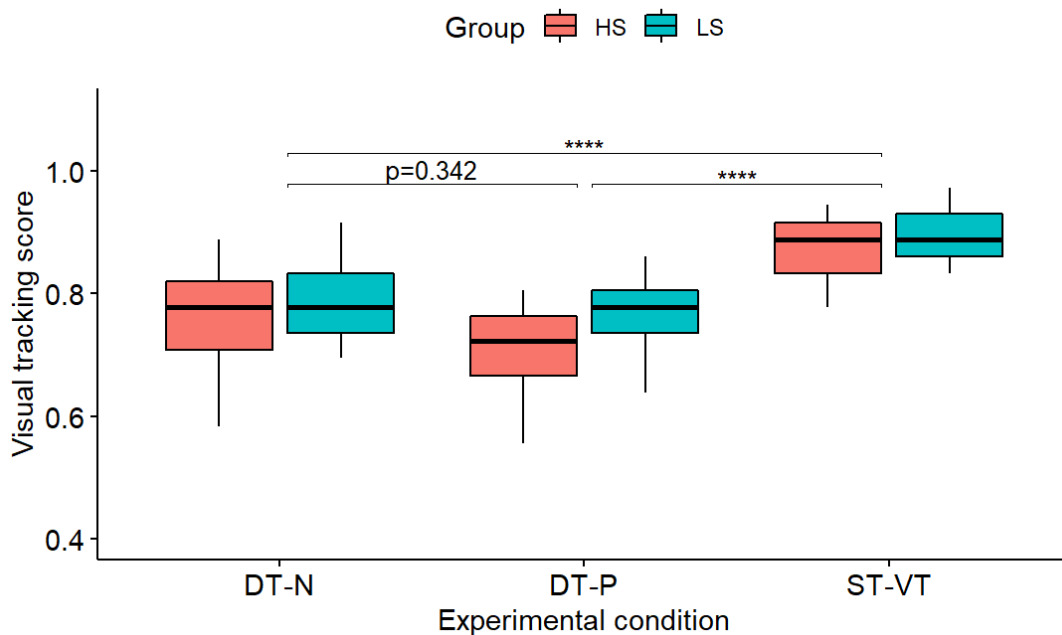


FIGURE 5.2 – Performance de suivi visuel des deux groupes de participants dans chaque condition expérimentale. **** : p.value ajustée < 0.001.

méthode par observation des boxplots. La normalité, l'équivariance et la sphéricité sont vérifiées par les tests de Shapiro-Wilk, Levene et Mauchly, respectivement.

5.1.2 Résultats

La figure 5.2 montre la performance de suivi visuel par groupe dans les trois conditions expérimentales. L'ANOVA mixte révèle un effet significatif de la condition expérimentale ($F(2,40)=31.489$, $p<0.001$, $\eta_p^2=0.612$), mais aucun effet significatif du groupe ($F(1,20)=2.559$, $p=0.125$, $\eta_p^2=0.113$) et aucun effet d'interaction significatif ($F(2,40)=0.268$, $p=0.766$, $\eta_p^2=0.013$). Les tests post-hoc montrent une meilleure performance de suivi visuel dans la condition ST-VT par rapport aux conditions DT-N ($p<0.001$) et DT-P ($p<0.001$), mais ils ne montrent aucune différence entre les conditions DT-N et DT-P ($p=0.342$).

5.1.3 Discussion

L'objectif de cette étude est d'observer l'influence de la double-tâche cognitivo-motrice sur la performance de suivi visuel des joueurs de football en fonction de leur niveau de compétition.

Conformément à la littérature (POTHIER et al., 2015; VAN BIESEN et al., 2018), une interférence liée à la double-tâche est observée avec une diminution de la performance de suivi visuel lorsque la réalisation d'une tâche d'interception est demandée. Le fait de rester vigilant à une éventuelle réception semble solliciter le joueur suffisamment pour interférer avec son suivi visuel comme l'atteste la réduction de performance observée même lorsqu'aucune action d'interception n'est effectuée. Des recherches supplémentaires doivent examiner si cet effet est associé ou non à une attraction du regard vers le ballon au détriment des joueurs-cibles à surveiller (HYÖNÄ et al., 2019). Aucune réduction supplémentaire n'est observée lorsque l'interception motrice est exécutée. Bien que les tâches motrices soient différentes, ceci est surprenant étant donné qu'une interférence sur la performance de suivi visuel est observée chez des athlètes exposés à différents niveaux d'instabilité bipodale (ZWIERKO et al., 2022). Les situations de passe en retrait ici ne semblent pas suffisamment difficiles pour altérer l'activité de suivi visuel des joueurs de football. Des contraintes d'interception plus complexes, *e.g.* vitesse de balle et distance à couvrir, doivent être testées à l'avenir. En outre, cela permettrait d'analyser l'interférence également sur la performance motrice des participants dans la tâche d'interception (SCHAEFER, 2014; FLEDDERMANN & ZENTGRAF, 2018).

Contrairement à ce qui était attendu (GABBETT et al., 2011; FAUBERT, 2013; QIU et al., 2018; SCHAEFER & SCORNAIENCHI, 2020), les résultats ne montrent pas d'effet modérateur de l'expertise dans la double-tâche, ni même d'effet lié au niveau de compétition sur le suivi visuel. Ces résultats ne soutiennent pas le fait que les demandes attentionnelles dans le suivi visuel sont réduites avec l'expertise. Une possibilité est que l'écart de niveau de compétition entre les participants ne soit pas suffisamment important pour espérer un effet de l'expertise (SWANN et al., 2015). Cependant, d'un point de vue descriptif, des joueurs de très haut niveau (Ligue 1) ne surpassent pas des joueurs de niveau départemental sur la tâche de suivi visuel. Cela laisse à penser que les explications les plus plausibles concernent plutôt la tâche et ses conditions de réalisation. Une de ces explications réside dans le manque de difficulté de la tâche de suivi visuel (QIU et al., 2018). Pour une tâche trop simplifiée, des joueurs réguliers peuvent montrer un succès similaire à celui de joueurs élités dans le suivi visuel en investissant plus d'efforts. Tout de même, la dégradation significative du suivi visuel dans les deux groupes causée par la double-tâche suggère que l'évaluation est suffisamment difficile pour provoquer des différences inter-individuelles. Une autre possibilité concerne l'éventuelle priorisation de la tâche d'interception dans les conditions double-tâche (SCHAEFER, 2014). Aucune ins-

truction n'a été donnée concernant la priorité entre les deux tâches. En match réel, il est probable que les postes reculés sur le terrain, *e.g.* un défenseur central ou le gardien de but, se focalisent avant tout sur la réussite du contrôle du ballon pour éviter un événement critique. Des situations relatives à d'autres postes de jeu devraient être testées pour voir si l'effet de l'expertise sur ce type de double-tâche est dépendant du poste du jeu (MARTÍN et al., 2017).

Une limite de cette étude est que le ballon s'arrêtait simplement au contact du pied du participant dans la tâche d'interception proposée. Or, le contrôle d'un ballon réel ne nécessite pas simplement de le toucher. Les efforts fournis pour accomplir la tâche d'interception sont donc certainement peu représentatifs de ceux nécessaires pour contrôler un ballon réel. Il est possible que des mouvements irréalistes se produisent pour simuler l'action de contrôle du ballon, ce qui limite la fidélité biomécanique de la tâche d'interception (COVACI et al., 2015 ; HARRIS et al., 2020a). Cela a probablement limité la différence de performance entre les conditions DT-P et DT-N. Améliorer le réalisme de l'interaction avec un ballon virtuel permettra à l'avenir de réaliser des mouvements d'interception plus réalistes et qui, certainement, interféreront davantage avec le suivi visuel.

5.1.4 Conclusion

L'étude actuelle ouvre la voie à l'utilisation de la RV avec des situations de jeu spécifiques pour évaluer l'attention visuelle des joueurs de football dans une double-tâche cognitive-motrice. Les résultats suggèrent que l'ajout d'une tâche motrice spécifique au sport est un autre moyen d'augmenter la complexité d'une tâche de suivi visuel. Cependant, l'influence de l'expertise dans la résolution de la double-tâche cognitivo-motrice n'est pas concluante. D'autres adaptations doivent être envisagées pour continuer de se rapprocher des contraintes multitâches du terrain dans l'étude de la performance sportive.

DISCUSSION GÉNÉRALE

Rappel des hypothèses de travail

L'objectif de ce travail de thèse est d'évaluer l'attention visuelle des joueurs de football dans une tâche de suivi visuel contextualisée aux contraintes du football. Les hypothèses principales à vérifier sont :

1. La performance de suivi visuel est associée au niveau de pratique au football.
2. L'utilisation des trajectoires réelles de match et de la double-tâche sont deux adaptations qui amplifient l'effet lié au niveau de pratique sur la performance de suivi visuel.

Ce chapitre met en perspective les résultats obtenus afin de délimiter la pertinence de la tâche de suivi visuel de multiples joueurs et des adaptations proposées par rapport à l'évaluation de la performance au football. Ce chapitre est ainsi articulé de la manière suivante. Les résultats principaux observés dans les trois études sur la performance de suivi visuel sont résumés et discutés au regard des deux hypothèses majeures de ce travail. De la même manière, les analyses complémentaires menées sur l'influence des caractéristiques situationnelles et de l'activité du regard sont résumées et discutées. Enfin, les apports pratiques et les limites principales sont exposées avant de terminer sur les perspectives de recherche issues de ce travail.

6.1 Effet du niveau de pratique au football sur la performance de suivi visuel

6.1.1 Résumé des résultats

À deux reprises, un effet lié à la pratique du football est observé dans le chapitre 4 avec une meilleure performance de suivi visuel chez des joueurs de football par rapport à des non-pratiquants. Cependant, dans le chapitre 5, aucune différence n'est constatée entre des joueurs de football de niveau national et des joueurs de niveau régional ou inférieur. Ainsi, la performance de suivi visuel mesurée dans la tâche proposée n'évolue pas linéairement avec le niveau de pratique des joueurs de football. Il est supposé que la tâche de suivi visuel proposée mobilise bien certaines compétences attentionnelles liés à la pratique du football (HARRIS et al., 2020b), mais pas nécessairement celles liées à l'expertise. En d'autres termes, distribuer adéquatement son attention visuelle entre les éléments de l'environnement est impératif pour pratiquer le football, mais la prise d'information permettant la performance sportive implique d'autres indices visuels et/ou d'autres processus qui ne sont pas sollicités dans la tâche de suivi visuel.

Le niveau de pratique sportive est le principal facteur analysé dans ce travail. Cependant, les données collectées peuvent avoir été influencées par d'autres facteurs confondants liés aux participants.

6.1.2 Considération des facteurs confondants

Un premier facteur confondant concerne la fréquence de visionnage des matchs de football. En effet, visualiser un match de football implique la perception de plusieurs éléments mobiles. Les adeptes des matchs de football pourraient ainsi disposer de compétences attentionnelles renforcées par rapport à la tâche de suivi visuel. À cet égard, les participants de l'étude 1 ont indiqué la fréquence à laquelle ils regardaient des matchs de football sur une échelle de Likert en 5 points (jamais - une fois par an - une fois par mois - une fois par semaine - plusieurs fois par semaine) dans le formulaire en ligne précédant la tâche de suivi visuel. Les résultats d'une ANOVA mixte à deux voies révèle un effet significatif de la condition expérimentale ($F(1,45)=28.170$, $p<0.001$) mais aucun effet de la fréquence d'observation ($F(4,45)=0.653$, $p=0.628$) et aucun effet d'interaction entre ces deux facteurs ($F(4,45)=0.647$, $p=0.631$) sur la performance de suivi visuel. Ainsi, le

visionnage régulier des matchs de football ne semble pas affecter significativement les données de l'étude 1.

Au-delà de juste visionner un match, le point de vue à partir duquel la situation est visualisée peut influencer la performance de suivi visuel (MARTÍN et al., 2017). Les points de vue du défenseur et du gardien sont choisis dans ce travail car la plupart des partenaires et des adversaires sont visibles dans une amplitude maximale de 180°, ce qui s'apparente le plus à l'exercice de suivi visuel. Le poste de jeu n'était pas un critère d'inclusion dans les deux premières études. Ainsi, un participant pouvait aussi bien être attaquant que défenseur. Le faible échantillon et la répartition inégale des joueurs par poste dans chaque étude (*e.g.* 3 attaquants, 6 milieux de terrain, 6 défenseurs, et 1 participant qui n'a pas renseigné sa position de jeu dans l'étude 1) ne permettent pas de vérifier l'influence du poste de jeu sur les données. À l'avenir, l'effet lié au poste de jeu au football sur la performance de suivi visuel devra être questionné. Pour aller encore plus loin, le point de vue à la 1^{re} personne d'un joueur sur le terrain pourrait être comparé à celui de la 3^e personne en vue aérienne, fournissant une perspective de la situation en plan frontal similaire à ce qui est proposé dans la tâche de suivi visuel traditionnelle.

Le sexe des participants est un autre facteur confondant qui a pu influencer les données des deux premières études (JIN et al., 2022). À partir des données de l'étude 1, une ANOVA à 2 voies montre un effet significatif du facteur sexe ($F(1)=6.306$, $p=0.014$), un effet significatif du facteur groupe ($F(2)=6.746$, $p=0.002$), mais elle ne montre pas d'effet d'interaction significatif, bien qu'une tendance soit observable ($F(2)=2.945$, $p=0.057$) sur la performance de suivi visuel (Tab. 6.1).

| | Hommes | Femmes |
|--------|--------------------|-------------------|
| NoTEAM | (n=8) 0.628±0.124 | (n=8) 0.624±0.134 |
| TEAM | (n=14) 0.738±0.106 | (n=2) 0.621±0.090 |
| SOCCER | (n=14) 0.716±0.093 | (n=4) 0.594±0.064 |

TABLE 6.1 – Performance de suivi visuel moyenne par sexe et par groupe de participants de l'étude 1.

Alors qu'aucune différence de performance de suivi visuel entre les hommes et les femmes du groupe NoTEAM n'est visible (Tab. 6.1), une performance supérieure semble exister chez les hommes par rapport aux femmes des groupes TEAM et NoTEAM (Tab. 6.1). Il se pourrait ainsi que l'effet lié à la pratique d'un sport collectif dans les données ne concerne que les écarts entre les hommes de l'étude 1. Cependant, les échantillons n'étant

pas du tout équilibrés dans les groupes SOCC et TEAM, il est difficile d'affirmer l'existence d'un véritable effet lié au sexe. À partir des données de l'étude 2, une ANOVA à 2 voies révèle un effet significatif du groupe ($F(1)=36.318$, $p<0.001$), mais pas d'effet significatif du sexe ($F(1)=0.301$, $p=0.585$), et pas d'effet interaction ($F(1)=2.892$, $p=0.094$) sur la performance de suivi visuel. L'effet du sexe, s'il existe, ne semble donc avoir influencé que les données de l'étude 1.

6.2 Pertinence des caractéristiques de contextualisation de la tâche de suivi visuel aux contraintes du football

6.2.1 Résumé des résultats

La chapitre 4 montre que l'effet lié à la pratique sportive sur la performance de suivi visuel n'est pas accru en utilisant des trajectoires réelles de match, assurant des déplacements collectifs cohérents et structurés dans les positions relatives entre joueurs, par rapport à des trajectoires pseudo-aléatoires. Ainsi, le suivi visuel des joueurs de football ne semble pas bénéficier de leurs connaissances spécifiques pour extraire des indices utiles sur les déplacements relatifs entre joueur. Le chapitre 5 montre que l'effet lié au niveau de compétition sur la performance de suivi visuel n'est pas accru en double-tâche cognitivo-motrice, mimant les contraintes d'interaction avec un ballon et la perception de l'environnement dans une situation de passe en retrait, par rapport à la réalisation de la tâche de suivi visuel de manière isolée. Ensemble, ces données suggèrent que l'effet lié au niveau de pratique sportive sur la performance de suivi visuel n'est pas conditionné par la représentativité de la tâche. Du moins, des adaptations additionnelles à celles réalisées ici sont à tester dans de nouvelles études. La pertinence des adaptations proposées dans ce travail au regard de l'évaluation de la performance des joueurs de football est maintenant discutée.

6.2.2 Influence du dispositif de diffusion

La tâche de suivi visuel est délivrée sur écran 2D et par HMD respectivement dans les études 1 et 2 du chapitre 4. Il était espéré que le support immersif de l'étude 2 favorise l'effet d'interaction recherché entre la pratique du football et l'utilisation de trajectoires

réelles de match pour animer les joueurs virtuel. Cependant, la même tendance se retrouve dans les résultats des 2 études. Augmenter la représentativité des conditions de visualisation ne semble donc pas suffire pour favoriser la perception des déplacements relatifs entre joueurs. Néanmoins, une taille d'effet sur le facteur groupe de participants plus importante est constatée dans l'étude 2 ($\eta_p^2=0.43$) par rapport à l'étude 1 ($\eta_p^2=0.13$). L'écart entre les joueurs de football et les non-pratiquants semble ainsi plus important en utilisant la RV via un HMD. Bien que cette différence soit d'origine multiple, cela pourrait s'expliquer par l'adoption de comportements d'exploration visuelle naturels en RV qui ne sont pas permis face à un écran 2D (MCGUCKIAN et al., 2018b; ROJAS FERRER et al., 2020).

6.2.3 Influence des trajectoires des joueurs virtuels

L'utilisation de trajectoires réelles a eu une influence limitée sur la performance de suivi visuel des joueurs de football ; deux explications peuvent être mise en avant.

Une première explication concerne l'espacement entre les joueurs-cibles à suivre. La littérature montre que la performance de suivi visuel est diminuée lorsque les objets diffusés changent brusquement de direction (LUU & HOWE, 2015). Ce résultat s'explique en partie par l'incapacité à extrapoler des trajectoires imprévisibles. Si le suivi visuel se base en partie sur l'extrapolation de la trajectoire des cibles, ce besoin est nécessaire surtout lorsque les cibles disparaissent momentanément du champ visuel (LUU & HOWE, 2015). Or, les joueurs-cibles sont choisis dans les études 1 et 2 de façon à ce que l'espace entre les deux joueurs-cibles les plus excentrés n'excède pas 90° par rapport au point de vue du participant. Bien que ce choix a été fait pour rester cohérent vis-à-vis de la tâche de suivi visuel traditionnelle, il a pu minimiser le besoin d'extrapoler la trajectoire des joueurs-cibles en les maintenant constamment visibles dans le champ visuel du participant. Ce besoin pourrait devenir impératif avec un espacement plus important entre les joueurs-cibles qui implique la sortie du champ visuel de l'un d'entre eux. Uniquement dans les situations réalistes, un participant pourrait s'épargner de focaliser son attention sur un joueur-cible excentré qui n'a pas de raison de changer d'espace au regard de la situation. Seuls les joueurs de football qui disposent des connaissances spécifiques nécessaires pourraient percevoir des comportements prévisibles dans ces situations. Il serait donc intéressant à l'avenir de réitérer cette comparaison avec un plus grand espacement entre les joueurs-cibles pour vérifier cette hypothèse.

Une deuxième explication concerne l'incapacité de la tâche de suivi visuel à permettre la compréhension du contenu de la scène visuelle. Dans une tâche de *pattern recognition*, NORTH et al. (2017) montrent que la capacité à reconnaître des situations de jeu familières est réduite lorsque certains éléments (des joueurs et/ou le ballon) sont retirés des stimuli. Ainsi, la lecture d'une situation semble nécessiter la présence d'un maximum d'individus. D'une certaine manière, le même phénomène pourrait se produire dans la tâche de suivi visuel. Même si 21 joueurs virtuels sont présents dans les stimuli délivrés, la tâche de suivi visuel implique de focaliser son attention sur uniquement 3 ou 4 d'entre eux pour accentuer leur perception au détriment des autres (phénomène de cécité d'inattention). Ainsi abstraits, ces derniers ne pourraient plus servir à percevoir la dynamique des déplacements relatifs entre joueurs. Ainsi, il est peu probable que les participants parviennent à distinguer une situation aux trajectoires réelles d'une situation aux trajectoires pseudo-aléatoires. Pour étayer cette hypothèse, une investigation complémentaire a demandé, de façon exploratoire, à 3 joueurs de football de réaliser de nouveau la tâche de suivi visuel de joueurs virtuels en HMD. Cette fois, sur 10 essais, les participants ont fait face à 5 situations réelles et 5 situations pseudo-aléatoires dans un ordre aléatoire. À l'issue de chaque situation, les participants ont répondu à la question suivante en donnant une note de 0 à 10 : « à quel point pensez-vous pouvoir rencontrer cette situation dans un vrai match de football ? ». Une réponse de 0 signifie que la situation est complètement chaotique alors que 10 signifie que la situation est complètement réelle. Cette mesure a pour but de récupérer leur perception du réalisme des trajectoires de la situation de jeu. La mesure sur la perception du réalisme est ensuite réalisée sur un autre bloc de nouvelles 10 situations, 5 réelles et 5 pseudo-aléatoires dans un ordre aléatoire, sans avoir à réaliser la tâche de suivi visuel. Toutes les situations présentées ont été choisies parmi les situations diffusées dans les études du chapitre 4. Les scores obtenus sont indiqués dans la figure 6.1.

Tout d'abord, uniquement dans la mesure de perception du réalisme, les joueurs trouvent que les situations réelles sont plus réalistes (7.10 ± 2.94) que les situations pseudo-aléatoires (5.30 ± 2.97). Selon les participants, le score inférieur à 10 pour les situations aux trajectoires réelles s'explique en partie par l'absence du ballon qui est un indice précieux pour donner du sens aux trajectoires des joueurs. Bien que les situations aux trajectoires pseudo-aléatoires semblent effectivement moins réalistes que celles aux trajectoires réelles, la distinction entre les deux types de situation pourraient être accentuée à partir de nouvelles procédures de *déstructuration* d'une situation. Par exemple, la procédure actuelle conserve les mêmes points de départ et d'arrivée des joueurs virtuels entre

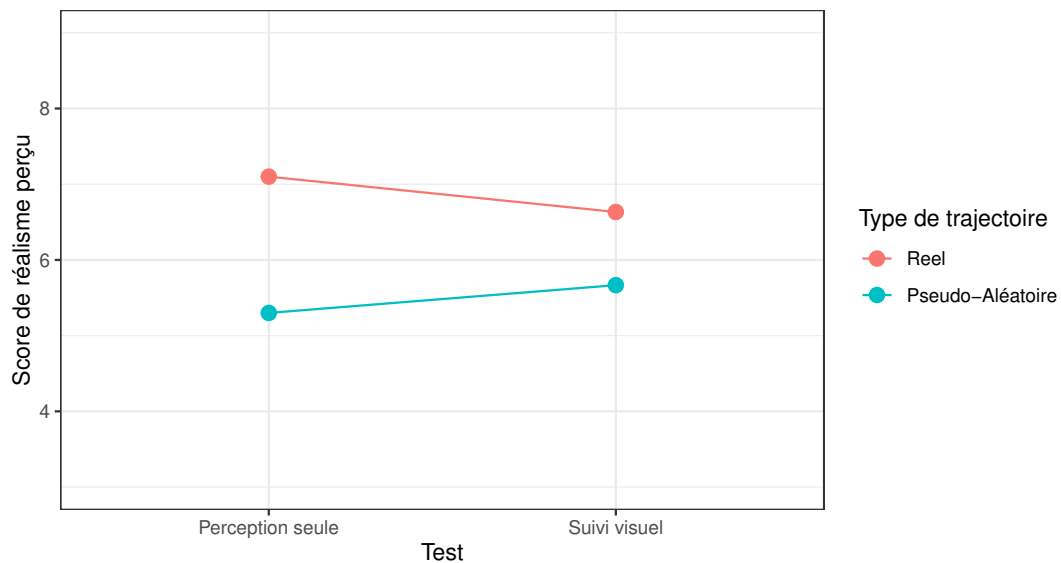


FIGURE 6.1 – **Mesure subjective du caractère réaliste des situations de jeu.** Le score est donné après simple visualisation d’une situation ou suite à une tâche de suivi visuel. L’évaluation concerne uniquement le réalisme des trajectoires, et non pas celui des avatars utilisés pour représenter les joueurs virtuels.

une situation réelle et sa situation pseudo-aléatoire associée (voir section 3.2.1.2). Une adaptation pourrait être de lever la contrainte sur les points d’arrivée de manière à ce que l’organisation spatiale des joueurs virtuels deviennent complètement incohérente à l’issue de la phase de suivi. Ensuite, lorsque la perception du réalisme est collectée suite à la tâche de suivi visuel, les joueurs ont indiqué un score de réalisme moyen de 6.63 (± 2.25) pour les situations réelles et de 5.67 (± 1.46) pour les situations aléatoires. La capacité moindre à discerner une situation réelle d’une situation aléatoire pourrait s’expliquer par la difficulté de consciemment percevoir les autres joueurs virtuels pendant la tâche de suivi visuel. Même si la tâche de suivi visuel reproduit partiellement les contraintes d’allocation de l’attention visuelle au football, sa capacité à permettre la perception des déplacements relatifs entre joueurs paraît donc limitée.

6.2.4 Influence d’une double-tâche cognitivo-motrice

La double-tâche cognitivo-motrice vise à simuler la difficulté de percevoir les autres joueurs tout en contrôlant le ballon. Cependant, l’absence d’effet lié au niveau de compétition sur la performance de suivi visuel pourrait s’expliquer en partie par l’aspect découplé de cette double-tâche. La limite de cette approche est que la tâche motrice n’est pas per-

tinente pour la tâche de suivi visuel et vice versa, de la même manière que pour l’envoi de SMS en marchant (KRASOVSKY et al., 2017). Le suivi visuel ne soutient pas l’exécution d’une action spécifique au football, et l’interception ne réinvestit pas les informations recueillies lors du suivi visuel. Ce découplage entre les deux tâches induit probablement des sentiments contre-intuitifs chez les joueurs de haut niveau. Selon les retours de certains participants, ne rien faire du ballon induit un inconfort dans l’exercice. Pour creuser cette explication, le sentiment de présence enregistré avec le questionnaire IPQ est analysé de manière exploratoire. Un score de présence est calculé pour chaque participant en tant que moyenne de 14 questions posées sur une échelle de Likert à 7 niveaux de -3 à +3¹. Bien que non significatif ($t=1.942$, $p=0.07$), le score de présence tend à être plus faible chez les joueurs de niveau national (0.750 ± 0.661) que chez les joueurs de niveau régional ou départemental (1.227 ± 0.428). D’une interprétation simplement descriptive, il y a effectivement moins de raisons d’espérer observer un effet de l’expertise si les joueurs de haut niveau ne se sentent pas présents et n’engagent pas de comportements d’exploration naturels (ROJAS FERRER et al., 2020). Les données recueillies dans l’étude 3 ne nous permettent pas d’attribuer la cause de ce faible sentiment de présence à l’utilisation de la RV ou au côté non-plausibles de la tâche. Des perspectives sont évoquées à ce propos dans la section 6.6.1 à venir.

6.3 Analyses complémentaires sur les facteurs influençant la performance de suivi visuel

6.3.1 Caractéristiques situationnelles de la tâche de suivi visuel

Il y a aujourd’hui une abondance de données relatives aux comportements réalisés par tous les joueurs pendant un match qui peuvent servir à simuler des situations de jeu dans un environnement virtuel. Les processus de sélection des situations utilisées dans ce travail sont basés simplement sur des caractéristiques qui paraissent cohérentes vis-à-vis de la tâche de suivi visuel (*e.g.* dispersion des joueurs sur la largeur du terrain). Cependant une importante variabilité dans la performance de suivi visuel liée aux situations délivrées est constatée. Ainsi, la réflexion sur les procédures de sélection de situations pertinentes doit être approfondie. De plus, si les demandes attentionnelles varient en fonction du poste de jeu (MARTÍN et al., 2017), la question de l’individualisation des situations et

1. voir <http://www.igroup.org/pq/ipq/download.php#French>

du point de vue sur le terrain virtuel doit également se poser. Enfin, afin d'identifier les contraintes situationnelles qui complexifient l'allocation d'attention visuelle dans la vie réelle, l'utilisation de données réelles paraît nécessaire. Cependant, la manipulation *a priori* des stimuli dans différentes conditions expérimentales sans les dénaturer est impossible. Par exemple, les trajectoires perçues ne seraient plus si réalistes en augmentant significativement la vitesse de déplacement. À cet égard, la procédure de clustering HCPC est envisagée pour décrire *a posteriori* les contraintes situationnelles associées à la difficulté du suivi visuel dans des situations issues de la vie réelle.

Dans l'étude 1 du chapitre 4, ce clustering considère les caractéristiques situationnelles des joueurs-cibles eux-mêmes, celles des autres joueurs-cibles présents dans la même situation, et les taux de suivi avec succès pour chaque groupe de participants. Cette analyse repose sur une description des caractéristiques situationnelles associées aux joueurs-cibles difficiles à suivre dans les deux conditions expérimentales. Face aux situations avec des trajectoires réelles, l'analyse révèle que les joueurs-cibles régulièrement perdus ou confondus sont très espacés les uns des autres ou, à l'inverse, sont regroupés dans un espace très encombrés de perturbateurs. Ainsi, l'organisation spatiale semble être un facteur prépondérant, par rapport à la vitesse, dans la mise en difficulté du suivi visuel de joueurs virtuels à partir de données réelles.

Pour vérifier la pertinence de cette approche, de futures investigations pourraient baser la sélection des situations de jeu à simuler et des joueurs-cibles à suivre à partir des profils définis dans l'analyse exploratoire par HCPC. Également, en plus d'entraîner la capacité à suivre des objets dans un petit espace qui se déplacent très rapidement, il serait intéressant d'entraîner la capacité à suivre des objets répartis dans un grand espace (EHMANN et al., 2021) ou dans un espace encombré (VATER et al., 2017a), pour voir si un transfert est possible vers des tests spécifiques au football (EHMANN et al., 2022b).

6.3.2 Activité du regard dans la tâche de suivi visuel

L'activité du regard est analysée en fonction du groupe de participants dans l'étude 2 du chapitre 4. Des saccades plus larges face aux situations présentant des joueurs virtuels espacés et une plus grande proportion du temps passé à fixer les joueurs-cibles centraux sont constatées chez les joueurs de football par rapport aux non-pratiquants. Néanmoins, il est encore difficile de savoir dans quelle mesure ces différences dans l'activité du regard soutiennent la meilleure performance de suivi visuel des joueurs de football.

Il existe une grande variabilité intra-groupe dans les mesures d'activité du regard. Étant donné que la performance de suivi visuel est associée à un contrôle effectif du regard (FEHD & SEIFFERT, 2010), plusieurs types d'activité d'exploration semblent favorables à la réussite dans la tâche de suivi visuel. En d'autres mots, il n'existe probablement pas qu'une seule et unique stratégie d'exploration visuelle optimale (approche *one size fits all*) (DICKS et al., 2017). En plus de son niveau d'expertise, il est possible que l'activité du regard d'un individu soit conditionnée par ses propres capacités perceptives et motrices (DICKS et al., 2017). Ainsi, deux individus qui disposent de capacités visuelles distinctes vont probablement adopter des stratégies d'exploration différentes, mais qui peuvent toutes deux mener au succès dans la tâche de suivi visuel. Finalement, au lieu de moyenniser les comportements d'exploration par groupe pour voir si une tendance se dégage, des analyses individuelles sont à envisager par la suite (DICKS et al., 2017).

Enfin, une réflexion sur la procédure de classification des données du regard en réalité virtuelle est menée dans ce travail. Les algorithmes de classification ont l'avantage d'épargner du temps pour les investigateurs mais ont l'inconvénient de fournir des résultats différents en fonction du type d'algorithme et des valeurs seuils utilisés (ANDERSSON et al., 2017). De plus, la validité de ces algorithmes est attestée dans des procédures très standardisées, *i.e.* avec une tête qui reste fixe face à un écran 2D. La manière dont ces algorithmes doivent être adaptés pour être fiables avec des mouvements d'exploration sans contraintes en RV est encore discutée (LLANES-JURADO et al., 2020 ; PASTEL et al., 2022). Pour avoir une confiance relative dans les comportements obtenus dans ce travail, la classification d'un sous-échantillon par un algorithme basé sur un seuil de vitesse est comparée à la classification de deux investigateurs. Bien que la classification manuelle soit supposée être une mesure *gold standard*, des divergences sont possibles entre plusieurs individus (ANDERSSON et al., 2017). La variabilité associée à la classification des comportements rend parfois difficile la comparaison des données issues de différentes procédures de classification. Alternativement à la classification des comportements du regard à partir de règles définies *a priori*, de nouvelles possibilités émergent à partir de l'intelligence artificielle pour caractériser les activités visuelles associées à l'expertise au football (HOSP et al., 2021a ; HOSP et al., 2021b).

6.4 Apports pratiques

D'un point de vue scientifique, ces travaux contribuent à la réflexion autour du besoin et de la manière de contextualiser les mesures perceptivo-cognitives pour les rendre pertinentes dans le développement de la performance sportive. Des contributions pratiques peuvent également être dégagées.

La performance sportive des joueurs de football est multifactorielle (HUGHES & BARTLETT, 2002 ; CARLING et al., 2008). Une difficulté pour les entraîneurs est de disposer des outils nécessaires pour capturer toutes les dimensions à développer. Plusieurs tests de terrain existent aujourd'hui pour mesurer les qualités physiques comme la vitesse ou l'endurance dans des conditions spécifiques à celles du football. Cependant, il existe encore peu de tests pour mesurer les compétences perceptivo-cognitives qui sont également cruciales pour atteindre un haut niveau de performance (ALI, 2011).

La finalité de ce type de recherche est de proposer un outil permettant de développer l'attention visuelle des joueurs de football de manière cohérente aux besoins sur le terrain. En l'état, il est impossible d'affirmer les bénéfices de la tâche proposée sur la performance sportive, mais il est suggéré que le potentiel de ce type d'outil est « d'éveiller » et de suivre le développement des jeunes joueurs dans leur capacité à explorer leur environnement pour collecter des informations sur des joueurs dispersés sur le terrain. Cependant, certains paramètres non examinés dans ce travail vont conditionner l'intérêt pratique de ce type d'outil. Premièrement, il est possible que la pertinence de ce type d'outil dépende des caractéristiques de l'individu, comme son âge (EHMANN et al., 2022a) ou son poste de jeu (MARTÍN et al., 2017). Deuxièmement, étant donné les contraintes des sportifs et en particulier du haut-niveau, aussi bénéfique soit-il, l'outil sera difficilement utilisé s'il nécessite beaucoup de séances de longue durée. Des formats courts, ou en guise d'échauffement, sont certainement à privilégier à condition évidemment de permettre des bénéfices sur le court ou le long terme. Enfin, la mise en place d'études d'acceptabilité et d'acceptation est importante en complément du développement de l'outil pour s'assurer de son utilisation par les joueurs et par les entraîneurs (MASCRET et al., 2022).

Une caractéristique qui différencie ce travail des autres recherches sur la performance de suivi visuel est l'utilisation des environnements virtuels et plus particulièrement de la réalité virtuelle. La RV permet de retranscrire plus fidèlement les contraintes sous lesquelles un joueur doit surveiller ses partenaires et adversaires. De plus, ce support techno-

logique permet d'implémenter des tâches motrices à réaliser pendant le suivi visuel. Une partie de ce travail de thèse concerne le développement de l'environnement virtuel à l'aide du moteur Unity 3D. En fonction des études, l'environnement a été déployé pour fonctionner sur un navigateur internet, dans un HMD et dans un CAVE. Ces différents supports présentent des avantages et des inconvénients. À partir des expériences et des démonstrations réalisées, le HMD nous paraît être le support le plus pertinent pour concevoir un outil d'évaluation et d'entraînement qui a le potentiel d'être déployé dans l'environnement de travail quotidien des équipes de sports collectifs. Il représente un juste compromis entre la facilité d'utilisation et l'immersion possible pour générer une expérience réaliste.

6.5 Limites

En plus de celles évoquées dans chacune des études, d'autres limites sont à signaler. Une première, liée à l'utilisation de trajectoires réelles, concerne la variabilité dans la difficulté des situations délivrées. Or, la complexité de la tâche conditionne l'effet de l'expertise sportive dans la tâche de suivi visuel (QIU et al., 2018). Pour éviter un effet plafond dans les résultats, des pré-expérimentations ont été menées en testant la performance de suivi visuel avec 3, 4 et 5 joueurs-cibles à suivre. Suivre 4 joueurs-cibles paraissait être un niveau de charge de suivi satisfaisant pour les 2 premières études, de manière à trouver un équilibre entre la difficulté de la tâche et l'effet du hasard induit par la procédure de sélection. Pour la troisième étude, seuls 3 joueurs-cibles devaient être suivis. Ce choix a été fait de manière à mettre en avant l'influence de la double-tâche, ce qui a été démontré dans l'étude 3. Néanmoins, pour chaque étude, il est possible que la difficulté choisie minimise l'effet du niveau de pratique. En jouant sur la double-tâche et/ou les caractéristiques situationnelles de la tâche de suivi visuel, différentes conditions de difficulté doivent être testées à l'avenir pour tenter de favoriser l'expression de l'expertise sportive sur la performance de suivi visuel.

Les données utilisées dans ce travail pour animer les situations de jeu ne contenaient que la trajectoire des joueurs et du ballon au cours du temps. L'environnement virtuel était donc dépourvu d'indices relatifs à la gestuelle et à l'orientation spatiale des joueurs, ainsi qu'à la rotation du ballon, ce qui implique deux limites dans ce travail. D'une part, la capacité à lire une situation par les joueurs de football est conditionnée par la présence des indices posturaux (NORTH et al., 2016). Même si l'un des objectifs de ce travail était de voir uniquement l'influence des trajectoires réelles, ce sont des informations qui auraient

pu également aider le suivi visuel des joueurs de football. Il est possible d'implémenter des mouvements humanoïdes, mais la complexité du football fait qu'une trajectoire peut être associée à différents modes de déplacements (*e.g.* course avant, course arrière, pas chassé...). Au lieu de risquer d'implémenter des comportements illogiques qui auraient finalement dégrader le réalisme des situations simulées et l'expérience ressentie (théorie de l'*uncanny valley* de Mori, voir STEIN et OHLER, 2017), le choix d'utiliser des mannequins simplifiés sans squelette a été préféré. D'autre part, aucune texture n'a été donnée au ballon de façon à masquer le fait qu'il avance sans rouler dans l'étude 3. Cependant, la texture et la rotation du ballon sont des caractéristiques importantes dans la tâche d'interception (DESSING & CRAIG, 2010 ; R. CASANOVA et al., 2015). L'accès aux postures du corps, ainsi qu'aux rotations du ballon, permettra à l'avenir d'augmenter le réalisme des prochaines situations simulées.

Enfin, une autre limite est que seule la version de la tâche de suivi visuel contextualisée au football est testée dans ce travail. Finalement, il est possible que les différences inter-individuelles observées soient liées uniquement à la capacité fondamentale de suivre plusieurs objets mobiles, indépendamment des contraintes de visualisation spécifiques au football. Il est impératif de comparer à l'avenir la performance de suivi visuel de joueurs de football mesurée dans une tâche traditionnelle, *i.e.* face à des sphères qui se déplacent aléatoirement sur un écran 2D, à celle mesurée dans la version proposée dans ce travail en RV. Cela permettra de déterminer dans quelle mesure les conditions de visualisation ont une influence sur la performance de suivi visuel mesurée chez des joueurs de football.

6.6 Perspectives

Dans la lignée des recherches menées sur le développement des compétences perceptivo-cognitives associées à la performance sportive au football, de nouvelles perspectives sont à envisager. Au-delà des régulations des conditions expérimentales énumérées dans les parties précédentes (*e.g.* moduler la difficulté de la tâche, améliorer le réalisme de la tâche d'interception...), ces perspectives concernent d'une part les adaptations plus profondes de la tâche de suivi visuel et d'autre part la problématique d'entraînement de la performance de suivi visuel.

6.6.1 Évolutions de la tâche de suivi visuel

Deux évolutions de la tâche de suivi visuel sont à envisager dans de nouvelles études.

La tâche de suivi visuel utilisée dans ces travaux s’inspire du MOT, qui implique la présentation d’objets uniformisés. Le Multiple-Identity-Traking (MIT) est une alternative plus proche du football dans la mesure où elle implique le suivi d’objets qui ont leur propre forme et identité (HYÖNÄ et al., 2019 ; HARRIS et al., 2020c). Passer vers une procédure MIT impliquerait de donner une identité à chacun des joueurs virtuels, *e.g.* avec un numéro de maillot, et de demander à suivre certaines de ces identités, *e.g.* numéros 8 et 12 de l’équipe en bleu et numéros 6 et 15 de l’équipe en rouge. L’identité des joueurs virtuels serait visible pendant la phase de suivi mais pas pendant la phase de sélection. Au moment de la sélection, le participant doit indiquer le joueur virtuel qui correspond à chaque identité cible. La littérature montre que cette alternative est plus difficile que la tâche de suivi visuel basée sur le MOT (OKSAMA & HYÖNÄ, 2016). À notre connaissance, encore aucune étude ne s’est inspirée de la tâche de MIT pour étudier l’attention visuelle des joueurs de sports collectifs.

Dans sa forme actuelle, la tâche de suivi visuel ne permet pas de restituer les informations collectées sur l’organisation spatiale des joueurs dans une action, ce qui est contradictoire à la logique de la performance au football (voir la section 6.2.4). Un couplage entre la perception et l’action est envisagé dans la tâche de suivi visuel avec la version de Multiple-Object-Avoidance (MOA) (MACKENZIE et al., 2022). Face à un écran 2D diffusant un disque bleu parmi plusieurs disques rouges, le MOA consiste à contrôler le disque bleu à l’aide de la souris pour éviter le plus longtemps possible toute collision avec un des disques rouges qui se déplacent aléatoirement. Cette tâche semble plus représentative des activités de conduite ou du sport que le MOT dans la mesure où le suivi de multiples objets sert à guider le mouvement du disque bleu. De plus, à l’inverse du MOT traditionnel, les indices sur lesquels se portent l’attention changent au cours du temps en fonction de leur risque de collision. MACKENZIE et al. (2022) ont observé une performance visuomotrice dans cette tâche plus élevée chez des sportifs pratiquant le football, le rugby, le basketball, le netball, des arts-martiaux, le badminton ou le canoë que chez des non-sportifs. Cependant, les conditions de visualisation et les modalités du contrôle de l’action restent peu représentatives du monde réel. Finalement, la navigation dans une foule de piétons dans un environnement virtuel serait une alternative plus écologique au MOA (MEERHOFF et al., 2018). Des réflexions supplémentaires sont nécessaires afin

d'identifier les possibilités de couplage entre le suivi visuel et une action spécifique dans le contexte du football. Par exemple, ces réflexions pourraient s'inspirer des adaptations faites sur la tâche de fenêtre d'attention dans l'étude de KLATT et SMEETON (2020). Au lieu de présenter des formes génériques, *e.g.* des ronds et des triangles, de couleurs variées sur un écran plat, l'alternative spécifique au football diffuse sur un large écran incurvé des images statiques présentant des joueurs en course séparés sur l'axe horizontal. Dans cette version, il est demandé d'identifier la présence (ou l'absence) et l'orientation des partenaires et adversaires de part et d'autre de l'écran pour diriger judicieusement une passe vers un partenaire démarqué. Ces instructions impliquent respectivement la perception des couleurs et des formes pour distinguer les partenaires disponibles (HÜTTERMANN et al., 2019b), mais également le réinvestissement de ces informations pour réaliser une passe (HÜTTERMANN et al., 2019a).

6.6.2 Entraînement du suivi visuel de multiples joueurs

Dans la mesure où la tâche de suivi visuel capture certains aspects de la pratique du football, elle peut présenter un intérêt dans le développement des capacités attentionnelles au travers d'un programme d'entraînement (FAUBERT, 2013). En collaboration avec le Stade Rennais FC, l'entraînabilité de la performance de suivi visuel a été questionnée de manière exploratoire chez des gardiens de but élites. Un protocole d'entraînement basé sur le suivi visuel de joueurs virtuels délivré dans un HMD a été mis en place à raison de 6 séances de 20 min réparties sur 2 mois dans les infrastructures du club. Le programme peut paraître léger, mais c'est une condition nécessaire pour pouvoir être inclus dans la routine des joueurs professionnels. La performance de suivi visuel en simple-tâche et en double-tâche a été évaluée chez 5 gardiens professionnels avant et après le protocole d'entraînement dans le CAVE du laboratoire M2S. L'évolution des performances mesurées entre les deux évaluations est illustrée dans la figure 6.2.

Bien que la dose d'entraînement peut sembler faible (seulement 6 séances de 20 min), une évolution moyenne des performances est constatée entre les deux évaluations. Étant donné que les performances plafonnaient dès l'évaluation pré-entraînement dans la condition simple-tâche (Fig. 6.2 - à gauche), l'évolution est plus marquée dans les deux conditions double-tâche (Fig. 6.2 - au centre et à droite). Cela suggère qu'un entraînement basé sur la tâche de suivi visuel en simple-tâche peut avoir des bénéfices sur la performance en double-tâche. Hypothétiquement, l'entraînement peut avoir réduit les demandes

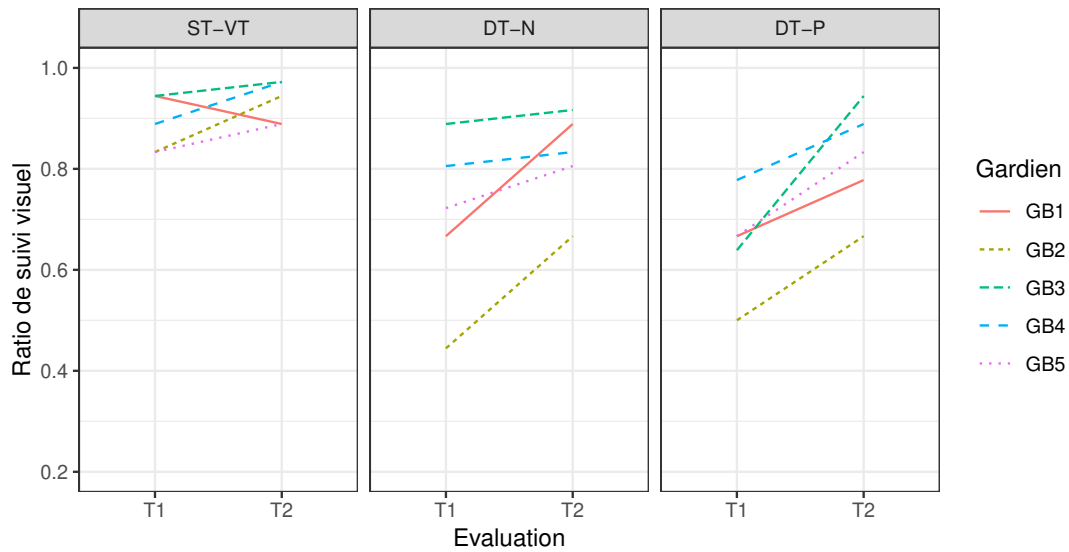


FIGURE 6.2 – Évolution de la performance de suivi visuel sur les trois conditions expérimentales entre les évaluations T1 et T2. T1 : évaluation pré-entraînement, T2 : évaluation post-entraînement, ST : condition simple-tâche de suivi visuel, DT-N : condition double-tâche de suivi visuel avec présence d’un ballon virtuel sans interception et DT-P : condition double-tâche de suivi visuel avec interception d’un ballon virtuel (voir section 5.1.1.3 pour les détails entre les conditions expérimentales). Chaque trait noir représente l’évolution de la performance de suivi visuel d’un gardien.

attentionnelles associées au suivi visuel, ce qui permet aux gardiens d’être plus robustes à l’interférence générée par la double-tâche. Un protocole expérimental rigoureux doit maintenant être mis en place pour valider les bénéfices d’un programme d’entraînement basé sur cette version de la tâche de suivi visuel. La question principale concerne le niveau de transfert vers d’autres mesures perceptivo-cognitives, quelles soient réalisées sur du jeu réduit (ROMEAS et al., 2016), ou sur des tâches plus standardisées (HARENBERG et al., 2021).

CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES

Contributions intégrées à la thèse

Publications dans une revue internationale

- Vu, A., Sorel, A., Faure, C., Aurousseau, A., Bideau, B., & Kulpa, R. (2022). Visual tracking assessment in a soccer-specific virtual environment : A web-based study. *PloS one*, 17(6), e0269643.
- Vu, A., Sorel, A., Limballe, A., Bideau, B., & Kulpa, R. (2022). Multiple Players Tracking in Virtual Reality : Influence of Soccer Specific Trajectories and Relationship With Gaze Activity. *Frontiers in Psychology*, 13, 901438.

Présentations orales

- Vu, A., Sorel, A., Faure, C., Aurousseau, A., Bideau, B., & Kulpa, R. Visual tracking assessment in a soccer-specific virtual environment : a web-based study. ACAPS, Montpellier, France, 27-29 Octobre 2021.
- Vu, A., Sorel, A., Limballe, A., Bideau, B., & Kulpa, R. Multiple Players Tracking in Virtual Reality : influence of soccer specific trajectories and relationship with gaze activity. WCSS2021, Coïmbra, Portugal, 15-17 Juin 2022.

Autres contributions

Publications dans une revue internationale

- Limballe, A., Kulpa, R., Vu, A., Mavromatis, M. & Bennett, S., J. (2022). Virtual reality boxing : Gaze-contingent manipulation of stimulus properties using blur. *Frontiers in Psychology*.

-
- Mascret, N., Montagne, G., Devrièze-Sence, A., Vu, A. & Kulpa, R. (2022). Acceptance by athletes of a virtual reality head-mounted display intended to enhance sport performance. *Psychology of Sport and Exercise*, 61, 102201.

Présentations orales

- Limballe, A., Vu, A., Bennett, S., J. & Kulpa, R. Innovative Virtual Reality method to assess the influence of a blur in boxing anticipation. ACAPS, Montpellier, France, 27-29 Octobre 2021.
- Limballe, A., Bennett, S., J., Aourousseau, A., Mavromatis, M., Vu, A. & Kulpa R. Virtual reality boxing : Gaze-contingent manipulation of stimulus properties using blur. IEEE VR-VHCIE Workshop, Christchurch, New Zealand - Online, 12-13 Mars 2022.

BIBLIOGRAPHIE

- ABERNETHY, B., MAXWELL, J. P., MASTERS, R. S., VAN DER KAMP, J. & JACKSON, R. C., (2007), Attentional processes in skill learning and expert performance.
- AKBAŞ, A., MARSZALEK, W., KAMIENIARZ, A., POLECHOŃSKI, J., SŁOMKA, K. J. & JURAS, G., (2019), Application of virtual reality in competitive athletes—A review, *Journal of human kinetics*, 691, 5-16.
- AKSUM, K. M., BROTTANGEN, L., BJØRNDAL, C. T., MAGNAGUAGNO, L. & JORDET, G., (2021), Scanning activity of elite football players in 11 vs. 11 match play : An eye-tracking analysis on the duration and visual information of scanning, *Plos one*, 168, e0244118.
- ALI, A., (2011), Measuring soccer skill performance : a review, *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 212, 170-183.
- ALLEN, R., MCGEORGE, P., PEARSON, D. & MILNE, A. B., (2004), Attention and expertise in multiple target tracking, *Applied Cognitive Psychology : The Official Journal of the Society for Applied Research in Memory and Cognition*, 183, 337-347.
- ALVAREZ, G. A. & FRANCONERI, S., (2007), How many objects can you track? : Evidence for a resource-limited attentive tracking mechanism, *Journal of vision*, 713, 14-14.
- AL-YAHYA, E., DAWES, H., SMITH, L., DENNIS, A., HOWELLS, K. & COCKBURN, J., (2011), Cognitive motor interference while walking : a systematic review and meta-analysis, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 353, 715-728.
- ANDERSSON, R., LARSSON, L., HOLMQVIST, K., STRIDH, M. & NYSTRÖM, M., (2017), One algorithm to rule them all? An evaluation and discussion of ten eye movement event-detection algorithms, *Behavior research methods*, 492, 616-637.
- APPELBAUM, L. G. & ERICKSON, G., (2018), Sports vision training : A review of the state-of-the-art in digital training techniques, *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 111, 160-189.
- ARAÚJO, D. & DAVIDS, K., (2016), Team synergies in sport : theory and measures, *Frontiers in psychology*, 7, 1449.

-
- BALAGUÉ, N., HRISTOVSKI, R., ARAGONÉS, D. & TENENBAUM, G., (2012), Nonlinear model of attention focus during accumulated effort, *Psychology of Sport and Exercise*, 135, 591-597.
- BARKER, K., ALLEN, R. & MCGEORGE, P., (2010), Multiple-object tracking : Enhanced visuospatial representations as a result of experience., *Experimental Psychology*, 573, 208.
- BASEVITCH, I., TENENBAUM, G., RAZON, S., BOIANGIN, N., WARD, P. et al., (2020), Anticipation and situation-assessment skills in soccer under varying degrees of informational constraint, *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 421, 59-69.
- BEAVAN, A., (2019), Extraordinary tools require extraordinary evidence.
- BEAVAN, A., CHIN, V., RYAN, L. M., SPIELMANN, J., MAYER, J., SKORSKI, S., MEYER, T. & FRANSEN, J., (2020a), A longitudinal analysis of the executive functions in high-level soccer players, *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 425, 349-357.
- BEAVAN, A., SPIELMANN, J., EHMANN, P. & MAYER, J., (2022), The Development of Executive Functions in High-Level Female Soccer Players, *Perceptual and Motor Skills*, 00315125221096989.
- BEAVAN, A., SPIELMANN, J., MAYER, J., SKORSKI, S., MEYER, T. & FRANSEN, J., (2019), Age-related differences in executive functions within high-level youth soccer players, *Brazilian Journal of Motor Behavior*, 132, 64-75.
- BEAVAN, A., SPIELMANN, J., MAYER, J., SKORSKI, S., MEYER, T. & FRANSEN, J., (2020b), The rise and fall of executive functions in high-level football players, *Psychology of Sport and Exercise*, 49, 101677.
- BEILock, S. L., CARR, T. H., MACMAHON, C. & STARKES, J. L., (2002a), When paying attention becomes counterproductive : impact of divided versus skill-focused attention on novice and experienced performance of sensorimotor skills., *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 81, 6.
- BEILock, S. L., WIERENGA, S. A. & CARR, T. H., (2002b), Expertise, attention, and memory in sensorimotor skill execution : Impact of novel task constraints on dual-task performance and episodic memory, *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 554, 1211-1240.
- BELLING, P. K., SUSS, J. & WARD, P., (2015), Advancing theory and application of cognitive research in sport : Using representative tasks to explain and predict skilled anticipation, decision-making, and option-generation behavior, *Psychology of Sport and Exercise*, 16, 45-59.

-
- BENOIT, J. J., ROUDAIA, E., JOHNSON, T., LOVE, T. & FAUBERT, J., (2020), The neuropsychological profile of professional action video game players, *PeerJ*, 8, e10211.
- BERNIER, M., THIENOT, E. & CODRON, R., (2009), Attention et performance sportive : état de la question en psychologie du sport appliquée, *Staps*, 1, 25-42.
- BERTON, F., HOYET, L., OLIVIER, A.-H., BRUNEAU, J., LE MEUR, O. & PETTRÉ, J., (2020), Eye-gaze activity in crowds : impact of virtual reality and density, *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 322-331.
- BERTON, F., OLIVIER, A.-H., BRUNEAU, J., HOYET, L. & PETTRÉ, J., (2019), Studying gaze behaviour during collision avoidance with a virtual walker : Influence of the virtual reality setup, *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 717-725.
- BETTENCOURT, K. C. & SOMERS, D. C., (2009), Effects of target enhancement and distractor suppression on multiple object tracking capacity, *Journal of vision*, 97, 9-9.
- BIDEAU, B., KULPA, R., VIGNAIS, N., BRAULT, S., MULTON, F. & CRAIG, C., (2009), Using virtual reality to analyze sports performance, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 302, 14-21.
- BIRD, J. M., (2020), The use of virtual reality head-mounted displays within applied sport psychology, *Journal of Sport Psychology in Action*, 112, 115-128.
- BISHOP, D. T., WRIGHT, M. J., JACKSON, R. C. & ABERNETHY, B., (2013), Neural bases for anticipation skill in soccer : an fMRI study.
- BOUZBIB, E., BAILLY, G., HALIYO, S. & FREY, P., (2021), "Can I Touch This?" : Survey of Virtual Reality Interactions via Haptic Solutions : Revue de Littérature des Interactions en Réalité Virtuelle par le biais de Solutions Haptiques, *32e Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine*, 1-16.
- BRAULT, S., BIDEAU, B., KULPA, R. & CRAIG, C. M., (2012), Detecting deception in movement : the case of the side-step in rugby, *PloS one*, 76, e37494.
- BROADBENT, D. P., CAUSER, J., WILLIAMS, A. M. & FORD, P. R., (2015), Perceptual-cognitive skill training and its transfer to expert performance in the field : Future research directions, *European journal of sport science*, 154, 322-331.
- CARLING, C., REILLY, T. & WILLIAMS, A. M., (2008), *Performance assessment for field sports*, Routledge.

-
- CASANOVA, F., OLIVEIRA, J., WILLIAMS, A. M. & GARGANTA, J., (2009), Expertise and perceptual-cognitive performance in soccer : a review, *Revista Portuguesa de Ciências do Desporto*, 91, 115-122.
- CASANOVA, R., BORG, O. & BOOTSMA, R. J., (2015), Perception of spin and the interception of curved football trajectories, *Journal of sports sciences*, 33 17, 1822-1830.
- CAUSER, J., SMEETON, N. J. & WILLIAMS, A. M., (2017), Expertise differences in anticipatory judgements during a temporally and spatially occluded task, *PloS one*, 122, e0171330.
- CAVANAGH, P. & ALVAREZ, G. A., (2005), Tracking multiple targets with multifocal attention, *Trends in cognitive sciences*, 97, 349-354.
- CHASE, W. G. & SIMON, H. A., (1973), The mind's eye in chess. *Visual information processing* (p. 215-281), Elsevier.
- CHERMANN, J.-F., ROMEAS, T., MARTY, F. & FAUBERT, J., (2018), Perceptual-cognitive three-dimensional multiple-object tracking task can help the monitoring of sport-related concussion, *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 41, e000384.
- CHIN, V., BEAVAN, A., FRANSEN, J., MAYER, J., KOHN, R., RYAN, L. M. & SISSON, S. A., (2021), Modelling age-related changes in executive functions of soccer players, *arXiv preprint arXiv :2105.01226*.
- COOKE, J. R., TER HORST, A. C., van BEERS, R. J. & MEDENDORP, W. P., (2017), Effect of depth information on multiple-object tracking in three dimensions : A probabilistic perspective, *PLoS computational biology*, 137, e1005554.
- COVACI, A., OLIVIER, A.-H. & MULTON, F., (2015), Visual perspective and feedback guidance for vr free-throw training, *IEEE computer graphics and applications*, 35 5, 55-65.
- CRAIG, C., (2013), Understanding perception and action in sport : how can virtual reality technology help?, *Sports Technology*, 64, 161-169.
- CUMMINGS, J. J. & BAILENSEN, J. N., (2016), How immersive is enough? A meta-analysis of the effect of immersive technology on user presence, *Media psychology*, 192, 272-309.
- DAHLIN, E., NEELY, A. S., LARSSON, A., BACKMAN, L. & NYBERG, L., (2008), Transfer of learning after updating training mediated by the striatum, *Science*, 320 5882, 1510-1512.

-
- DEHAENE, S., CHANGEUX, J.-P., NACCACHE, L., SACKUR, J. & SERGENT, C., (2006), Conscious, preconscious, and subliminal processing : a testable taxonomy, *Trends in cognitive sciences*, 10 5, 204-211.
- DESSING, J. C. & CRAIG, C. M., (2010), Bending it like Beckham : how to visually fool the goalkeeper, *PLoS One*, 5 10, e13161.
- DICKS, M., BUTTON, C., DAVIDS, K., CHOW, J. Y. & VAN DER KAMP, J., (2017), Keeping an eye on noisy movements : On different approaches to perceptual-motor skill research and training, *Sports Medicine*, 47, 575-581.
- DICKS, M., CLASHING, C., O'REILLY, L. & MILLS, C., (2016), Perceptual-motor behaviour during a simulated pedestrian crossing, *Gait & posture*, 49, 241-245.
- DICKS, M., DAVIDS, K. & BUTTON, C., (2009), Representative task design for the study of perception and action in sport., *International Journal of Sport Psychology*.
- DICKS, M., DAVIDS, K. & BUTTON, C., (2010), Individual differences in the visual control of intercepting a penalty kick in association football, *Human movement science*, 29 3, 401-411.
- DREW, T., HOROWITZ, T. S. & VOGEL, E. K., (2013), Swapping or dropping? Electrophysiological measures of difficulty during multiple object tracking, *Cognition*, 126 2, 213-223.
- DÜKING, P., HOLMBERG, H.-C. & SPERLICH, B., (2018), The potential usefulness of virtual reality systems for athletes : a short SWOT analysis, *Frontiers in Physiology*, 9, 128.
- DYE, M. W. & BAVELIER, D., (2010), Differential development of visual attention skills in school-age children, *Vision research*, 50 4, 452-459.
- EHMANN, P., BEAVAN, A., SPIELMANN, J., MAYER, J., ALTMANN, S., RUF, L., ROHRMANN, S., IRMER, J. P. & ENGLERT, C., (2022a), Perceptual-cognitive performance of youth soccer players in a 360°-environment—Differences between age groups and performance levels, *Psychology of Sport and Exercise*, 59, 102120.
- EHMANN, P., BEAVAN, A., SPIELMANN, J., MAYER, J., RUF, L., ALTMANN, S., FORCHER, L., KLEVER, N., ROHRMANN, S., NUSS, C. et al., (2022b), Perceptual-cognitive performance of youth soccer players in a 360°-environment—An investigation of the relationship with soccer-specific performance and the effects of systematic training, *Psychology of Sport and Exercise*, 102220.
- EHMANN, P., BEAVAN, A., SPIELMANN, J., RUF, L., MAYER, J., ROHRMANN, S., NUSS, C. & ENGLERT, C., (2021), 360°-multiple object tracking in team sport athletes :

-
- Reliability and relationship to visuospatial cognitive functions, *Psychology of Sport and Exercise*, 55, 101952.
- EL JAMIY, F. & MARSH, R., (2019), Survey on depth perception in head mounted displays : distance estimation in virtual reality, augmented reality, and mixed reality, *IET Image Processing*, 135, 707-712.
- EMERY, N. J., (2000), The eyes have it : the neuroethology, function and evolution of social gaze, *Neuroscience & biobehavioral reviews*, 24 6, 581-604.
- ERICSSON, K. A. & SMITH, J., (1991), Prospects and Limits of the Empirical Study of Expertise : An Introduction, *Toward a general theory of expertise : Prospects and limits*, 11.
- ERICSSON, K. A. & WILLIAMS, A. M., (2007), Capturing naturally occurring superior performance in the laboratory : translational research on expert performance., *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 133, 115.
- FARROW, D., REID, M., BUSZARD, T. & KOVALCHIK, S., (2018), Charting the development of sport expertise : challenges and opportunities, *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 11 1, 238-257.
- FAUBERT, J., (2013), Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes, *Scientific reports*, 3 1, 1-3.
- FAURE, C., LIMBALLE, A., BIDEAU, B. & KULPA, R., (2020), Virtual reality to assess and train team ball sports performance : A scoping review, *Journal of sports Sciences*, 38 2, 192-205.
- FEHD, H. M. & SEIFFERT, A. E., (2008), Eye movements during multiple object tracking : Where do participants look ?, *Cognition*, 108 1, 201-209.
- FEHD, H. M. & SEIFFERT, A. E., (2010), Looking at the center of the targets helps multiple object tracking, *Journal of vision*, 10 4, 19-19.
- FERIA, C. S., (2012), The effects of distractors in multiple object tracking are modulated by the similarity of distractor and target features, *Perception*, 41 3, 287-304.
- FLEDDERMANN, M.-T., HEPPE, H. & ZENTGRAF, K., (2019), Off-court generic perceptual-cognitive training in elite volleyball athletes : Task-specific effects and levels of transfer, *Frontiers in psychology*, 10, 1599.
- FLEDDERMANN, M.-T. & ZENTGRAF, K., (2018), Tapping the full potential? Jumping performance of volleyball athletes in game-like situations, *Frontiers in psychology*, 9, 1375.

-
- FORTES, L. S., ALMEIDA, S. S., PRAÇA, G. M., NASCIMENTO-JÚNIOR, J. R., LIMA-JUNIOR, D., BARBOSA, B. T. & FERREIRA, M. E., (2021), Virtual reality promotes greater improvements than video-stimulation screen on perceptual-cognitive skills in young soccer athletes, *Human Movement Science*, 79, 102856.
- FRANCONERI, S., JONATHAN, S. & SCIMECA, J., (2010), Tracking multiple objects is limited only by object spacing, not by speed, time, or capacity, *Psychological science*, 21 7, 920-925.
- FRANCONERI, S., LIN, J. Y., ENNS, J. T., PYLYSHYN, Z. W. & FISHER, B., (2008), Evidence against a speed limit in multiple-object tracking, *Psychonomic bulletin & review*, 15 4, 802-808.
- FURLEY, P. & MEMMERT, D., (2011), Studying cognitive adaptations in the field of sport : Broad or narrow transfer? A comment on Allen, Fioratou, and McGeorge (2011), *Perceptual and Motor Skills*, 113 2, 481-488.
- FURLEY, P., MEMMERT, D. & HELLER, C., (2010), The dark side of visual awareness in sport : Inattentive blindness in a real-world basketball task, *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72 5, 1327-1337.
- GABBETT, T. J. & ABERNETHY, B., (2012), Dual-task assessment of a sporting skill : influence of task complexity and relationship with competitive performances, *Journal of sports sciences*, 30 16, 1735-1745.
- GABBETT, T. J., WAKE, M. & ABERNETHY, B., (2011), Use of dual-task methodology for skill assessment and development : Examples from rugby league, *Journal of Sports Sciences*, 29 1, 7-18.
- GIBSON, J. J., (2014), *The ecological approach to visual perception : classic edition*, Psychology press.
- GRAY, R., (2004), Attending to the execution of a complex sensorimotor skill : expertise differences, choking, and slumps., *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 10 1, 42.
- GRAY, R., (2019), Virtual environments and their role in developing perceptual-cognitive skills in sports. *Anticipation and decision making in sport* (p. 342-358), Routledge.
- GREEN, C. S. & BAVELIER, D., (2006), Enumeration versus multiple object tracking : The case of action video game players, *Cognition*, 101 1, 217-245.
- GÜLDENPENNING, I., KUNDE, W. & WEIGELT, M., (2017), How to trick your opponent : A review article on deceptive actions in interactive sports, *Frontiers in psychology*, 8, 917.

-
- GULEC, U., YILMAZ, M., ISLER, V., O'CONNOR, R. V. & CLARKE, P. M., (2019), A 3D virtual environment for training soccer referees, *Computer Standards & Interfaces*, 64, 1-10.
- HADLOW, S. M., PANCHUK, D., MANN, D. L., PORTUS, M. R. & ABERNETHY, B., (2018), Modified perceptual training in sport : a new classification framework, *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21 9, 950-958.
- HARENBERG, S., MCCARVER, Z., WORLEY, J., MURR, D., VOSLOO, J., KAKAR, R. S., MCCAFFREY, R., DORSCH, K. & HÖNER, O., (2021), The effectiveness of 3D multiple object tracking training on decision-making in soccer, *Science and Medicine in Football*, 1-8.
- HARRIS, D. J., BIRD, J. M., SMART, P. A., WILSON, M. R. & VINE, S. J., (2020a), A framework for the testing and validation of simulated environments in experimentation and training, *Frontiers in Psychology*, 11, 605.
- HARRIS, D. J., BUCKINGHAM, G., WILSON, M. R., BROOKES, J., MUSHTAQ, F., MONWILLIAMS, M. & VINE, S. J., (2021a), Exploring sensorimotor performance and user experience within a virtual reality golf putting simulator, *Virtual Reality*, 25 3, 647-654.
- HARRIS, D. J., HARDCASTLE, K. J., WILSON, M. R. & VINE, S. J., (2021b), Assessing the learning and transfer of gaze behaviours in immersive virtual reality, *Virtual Reality*, 25 4, 961-973.
- HARRIS, D. J., WILSON, M. R., CROWE, E. M. & VINE, S. J., (2020b), Examining the roles of working memory and visual attention in multiple object tracking expertise, *Cognitive processing*, 21 2, 209-222.
- HARRIS, D. J., WILSON, M. R., HOLMES, T., de BURGH, T. & VINE, S. J., (2022), Eye Movements in Sports Research and Practice : Immersive Technologies as Optimal Environments for the Study of Gaze Behavior. *Eye Tracking* (p. 207-221), Springer.
- HARRIS, D. J., WILSON, M. R., SMITH, S. J., MEDER, N. & VINE, S. J., (2020c), Testing the effects of 3D Multiple Object Tracking training on near, mid and far transfer, *Frontiers in Psychology*, 11, 196.
- HARRIS, D. J., WILSON, M. R. & VINE, S. J., (2018), A systematic review of commercial cognitive training devices : implications for use in sport, *Frontiers in psychology*, 709.

-
- HEILMANN, F., WEIGEL, P. & WOLLNY, R., (2021), Analysis of cognitive abilities measured in a laboratory-controlled 360 simulation in soccer, *German Journal of Exercise and Sport Research*, 51 3, 302-311.
- HELSEN, W. F. & PAUWELS, J., (1993), The relationship between expertise and visual information processing in sport. *Advances in psychology* (p. 109-134), Elsevier.
- HELSEN, W. F. & STARKES, J. L., (1999), A multidimensional approach to skilled perception and performance in sport, *Applied Cognitive Psychology : The Official Journal of the Society for Applied Research in Memory and Cognition*, 13 1, 1-27.
- HENDERSON, J. M., (2003), Human gaze control during real-world scene perception, *Trends in cognitive sciences*, 7 11, 498-504.
- HODGES, N. J., HUYS, R. & STARKES, J. L., (2007), Methodological review and evaluation of research in expert performance in sport.
- HOLCOMBE, A. O. & CHEN, W.-Y., (2012), Exhausting attentional tracking resources with a single fast-moving object, *Cognition*, 123 2, 218-228.
- HOPE, R. M., RANTANEN, E. M. & OKSAMA, L., (2010), Multiple identity tracking and entropy in an ATC-like task, *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, 54 13, 1012-1016.
- HOSP, B., SCHULTZ, F., HÖNER, O. & KASNECI, E., (2021a), Soccer goalkeeper expertise identification based on eye movements, *PloS one*, 16 5, e0251070.
- HOSP, B., SCHULTZ, F., KASNECI, E. & HÖNER, O., (2021b), Expertise classification of soccer goalkeepers in highly dynamic decision tasks : a deep learning approach for temporal and spatial feature recognition of fixation image patch sequences, *Frontiers in Sports and Active Living*, 183.
- HUANG, H.-J. & MERCER, V. S., (2001), Dual-task methodology : applications in studies of cognitive and motor performance in adults and children, *Pediatric Physical Therapy*, 13 3, 133-140.
- HUFF, M., JAHN, G. & SCHWAN, S., (2009), Tracking multiple objects across abrupt viewpoint changes, *Visual Cognition*, 17 3, 297-306.
- HUFF, M., PAPANMEIER, F., JAHN, G. & HESSE, F. W., (2010), Eye movements across viewpoint changes in multiple object tracking, *Visual Cognition*, 18 9, 1368-1391.
- HUGHES, M. & BARTLETT, R., (2002), The use of performance indicators in performance analysis, *Journal of sports sciences*, 20 10, 739-754.
- HUGHES, M. & FRANKS, I., (2005), Analysis of passing sequences, shots and goals in soccer, *Journal of sports sciences*, 23 5, 509-514.

-
- HÜTTERMANN, S., FORD, P. R., WILLIAMS, A. M., VARGA, M. & SMEETON, N. J., (2019a), Attention, perception, and action in a simulated decision-making task, *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *41* 4, 230-241.
- HÜTTERMANN, S. & MEMMERT, D., (2017), The attention window : A narrative review of limitations and opportunities influencing the focus of attention, *Research quarterly for exercise and sport*, *88* 2, 169-183.
- HÜTTERMANN, S. & MEMMERT, D., (2018), Effects of lab-and field-based attentional training on athletes' attention-window, *Psychology of Sport and Exercise*, *38*, 17-27.
- HÜTTERMANN, S., MEMMERT, D. & SIMONS, D. J., (2014), The size and shape of the attentional "spotlight" varies with differences in sports expertise., *Journal of Experimental Psychology : Applied*, *20* 2, 147.
- HÜTTERMANN, S., SMEETON, N. J., FORD, P. R. & WILLIAMS, A. M., (2019b), Color perception and attentional load in dynamic, time-constrained environments, *Frontiers in psychology*, *9*, 2614.
- HYÖNÄ, J., LI, J. & OKSAMA, L., (2019), Eye behavior during multiple object tracking and multiple identity tracking, *Vision*, *3* 3, 37.
- IORDANESCU, L., GRABOWECKY, M. & SUZUKI, S., (2009), Demand-based dynamic distribution of attention and monitoring of velocities during multiple-object tracking, *Journal of vision*, *9* 4, 1-1.
- JAMES, N., (2006), Notational analysis in soccer : past, present and future., *International journal of performance analysis in sport*, *6* 2, 67-81.
- JANELLE, C. M. & HATFIELD, B. D., (2008), Visual attention and brain processes that underlie expert performance : Implications for sport and military psychology, *Military Psychology*, *20* sup1, S39-S69.
- JIN, P., GE, Z. & FAN, T., (2022), Team ball sport experience minimizes sex difference in visual attention, *Frontiers in Psychology*, *13*.
- JIN, P., LI, X., MA, B., GUO, H., ZHANG, Z. & MAO, L., (2020), Dynamic visual attention characteristics and their relationship to match performance in skilled basketball players, *PeerJ*, *8*, e9803.
- JORDET, G., AKSUM, K. M., PEDERSEN, D. N., WALVEKAR, A., TRIVEDI, A., MCCALL, A., IVARSSON, A. & PRIESTLEY, D., (2020), Scanning, contextual factors, and association with performance in english premier league footballers : an investigation across a season, *Frontiers in psychology*, *11*, 553813.

-
- KAHNEMAN, D., (1973), *Attention and effort*, Englewood Cliffs.
- KALÉN, A., BISAGNO, E., MUSCULUS, L., RAAB, M., PÉREZ-FERREIRÓS, A., WILLIAMS, A. M., ARAÚJO, D., LINDWALL, M. & IVARSSON, A., (2021), The role of domain-specific and domain-general cognitive functions and skills in sports performance : A meta-analysis., *Psychological bulletin*, 147 12, 1290.
- KAMKAR, S., MOGHADDAM, H. A., LASHGARI, R., OKSAMA, L., LI, J. & HYÖNÄ, J., (2020), Effectiveness of “rescue saccades” on the accuracy of tracking multiple moving targets : An eye-tracking study on the effects of target occlusions, *Journal of Vision*, 20 12, 5-5.
- KITTEL, A., LARKIN, P., CUNNINGHAM, I. & SPITTLE, M., (2020), 360 virtual reality : A SWOT analysis in comparison to virtual reality, *Frontiers in Psychology*, 11, 563474.
- KITTEL, A., LARKIN, P., ELSWORTHY, N. & SPITTLE, M., (2019), Using 360 virtual reality as a decision-making assessment tool in sport, *Journal of Science and Medicine in Sport*, 22 9, 1049-1053.
- KLATT, S. & SMEETON, N. J., (2020), Immersive screens change attention width but not perception or decision-making performance in natural and basic tasks, *Applied ergonomics*, 82, 102961.
- KLOSTERMANN, A. & MOEINIRAD, S., (2020), Fewer fixations of longer duration? Expert gaze behavior revisited, *German journal of exercise and sport research*, 50 1, 146-161.
- KLOSTERMANN, A., VATER, C., KREDEL, R. & HOSSNER, E.-J., (2020), Perception and action in sports. On the functionality of foveal and peripheral vision, *Frontiers in sports and active living*, 1, 66.
- KOCH, I., POLJAC, E., MÜLLER, H. & KIESEL, A., (2018), Cognitive structure, flexibility, and plasticity in human multitasking—An integrative review of dual-task and task-switching research., *Psychological bulletin*, 144 6, 557.
- KRASOVSKY, T., WEISS, P. L. & KIZONY, R., (2017), A narrative review of texting as a visually-dependent cognitive-motor secondary task during locomotion, *Gait & posture*, 52, 354-362.
- KREDEL, R., VATER, C., KLOSTERMANN, A. & HOSSNER, E.-J., (2017), Eye-tracking technology and the dynamics of natural gaze behavior in sports : A systematic review of 40 years of research, *Frontiers in psychology*, 8, 1845.

-
- KRUPITZER, C., NABER, J., STAUFFERT, J.-P., MAYER, J., SPIELMANN, J., EHMANN, P., BOCI, N., BÜRKLE, M., HO, A., KOMOREK, C. et al., (2022), CortexVR : Immersive analysis and training of cognitive executive functions of soccer players using virtual reality and machine learning, *Frontiers in Psychology*, 5139.
- LAGO, M. A., (2021), SimplePhy : An open-source tool for quick online perception experiments, *Behavior Research Methods*, 534, 1669-1676.
- LAND, M. F., (1999), Motion and vision : why animals move their eyes, *Journal of Comparative Physiology A*, 1854, 341-352.
- LAPPI, O., (2016), Eye movements in the wild : Oculomotor control, gaze behavior & frames of reference, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 69, 49-68.
- LÊ, S., JOSSE, J. & HUSSON, F., (2008), FactoMineR : an R package for multivariate analysis, *Journal of statistical software*, 25, 1-18.
- LE NOURY, P., POLMAN, R., MALONEY, M. & GORMAN, A., (2022), A Narrative Review of the Current State of Extended Reality Technology and How it can be Utilised in Sport, *Sports Medicine*, 1-17.
- LEGAULT, I. & FAUBERT, J., (2012), Perceptual-cognitive training improves biological motion perception : evidence for transferability of training in healthy aging, *Neuroreport*, 238, 469-473.
- LEGAULT, I., SUTTERLIN-GUINDON, D. & FAUBERT, J., (2022), Perceptual cognitive abilities in young athletes : A gender comparison, *Plos one*, 178, e0273607.
- LELE, A., (2013), Virtual reality and its military utility, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 41, 17-26.
- LEVI, H. R. & JACKSON, R. C., (2018), Contextual factors influencing decision making : Perceptions of professional soccer players, *Psychology of Sport and Exercise*, 37, 19-25.
- LI, Q., JOO, S. J., YEATMAN, J. D. & REINECKE, K., (2020), Controlling for participants' viewing distance in large-scale, psychophysical online experiments using a virtual chinrest, *Scientific reports*, 101, 1-11.
- LIEBERMANN, D. G., KATZ, L., HUGHES, M. D., BARTLETT, R. M., MCCLEMENTS, J. & FRANKS, I. M., (2002), Advances in the application of information technology to sport performance, *Journal of sports sciences*, 2010, 755-769.
- LIMBALLE, A., KULPA, R. & BENNETT, S., (2022), Using blur for perceptual investigation and training in sport ? A clear picture of the evidence and implications for future research, *Frontiers in Psychology*, 12.

-
- LLANES-JURADO, J., MARÍN-MORALES, J., GUIXERES, J. & ALCAÑIZ, M., (2020), Development and calibration of an eye-tracking fixation identification algorithm for immersive virtual reality, *Sensors*, 2017, 4956.
- LOCHNER, M. J. & TRICK, L. M., (2014), Multiple-object tracking while driving : the multiple-vehicle tracking task, *Attention, Perception, & Psychophysics*, 768, 2326-2345.
- LOOMIS, J. M., BLASCOVICH, J. J. & BEALL, A. C., (1999), Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology, *Behavior research methods, instruments, & computers*, 314, 557-564.
- LUKAVSKY, J., (2013), Eye movements in repeated multiple object tracking, *Journal of Vision*, 137, 9-9.
- LUU, T. & HOWE, P. D., (2015), Extrapolation occurs in multiple object tracking when eye movements are controlled, *Attention, Perception, & Psychophysics*, 77, 1919-1929.
- MACKENZIE, A. K., VERNON, M. L., COX, P. R., CRUNDALL, D., DALY, R. C., GUEST, D., MUHL-RICHARDSON, A. & HOWARD, C. J., (2022), The Multiple Object Avoidance (MOA) task measures attention for action : Evidence from driving and sport, *Behavior research methods*, 543, 1508-1529.
- 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. et al., (2014), Visual tracking speed is related to basketball-specific measures of performance in NBA players, *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 289, 2406-2414.
- MANN, D. L., CAUSER, J., NAKAMOTO, H. & RUNSWICK, O. R., (2019), Visual search behaviours in expert perceptual judgements. *Anticipation and decision making in sport* (p. 59-78), Routledge.
- MANN, D. L., FARROW, D., SHUTTLEWORTH, R., HOPWOOD, M. & MACMAHON, C., (2009), The influence of viewing perspective on decision-making and visual search behaviour in an invasive sport, *International Journal of Sport Psychology*, 404, 546-564.
- MANN, D. L., TY, D., WILLIAMS, A. M., WARD, P. & JANELLE, C. M., (2007), Perceptual-cognitive expertise in sport : A meta-analysis, *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 294, 457-478.

-
- MARTÍN, A., SFER, A. M., D'URSO VILLAR, M. A. & BARRAZA, J. F., (2017), Position affects performance in multiple-object tracking in rugby union players, *Frontiers in psychology*, 8, 1494.
- MASCRET, N., MONTAGNE, G., DEVRIÈSE-SENCE, A., VU, A. & KULPA, R., (2022), Acceptance by athletes of a virtual reality head-mounted display intended to enhance sport performance, *Psychology of Sport and Exercise*, 61, 102201.
- MCGUCKIAN, T. B., COLE, M. H., JORDET, G., CHALKLEY, D. & PEPPING, G.-J., (2018a), Don't turn blind! The relationship between exploration before ball possession and on-ball performance in association football, *Frontiers in psychology*, 9, 2520.
- MCGUCKIAN, T. B., COLE, M. H. & PEPPING, G.-J., (2018b), A systematic review of the technology-based assessment of visual perception and exploration behaviour in association football, *Journal of Sports Sciences*, 36 8, 861-880.
- MEERHOFF, L. A., BRUNEAU, J., VU, A., OLIVIER, A.-H. & PETTRÉ, J., (2018), Guided by gaze : Prioritization strategy when navigating through a virtual crowd can be assessed through gaze activity, *Acta psychologica*, 190, 248-257.
- MEMMERT, D., (2009), Pay attention! A review of visual attentional expertise in sport, *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 22, 119-138.
- MEMMERT, D., FURLEY, P. et al., (2007), " I spy with my little eye!" : breadth of attention, inattentive blindness, and tactical decision making in team sports, *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 29 3, 365.
- MEMMERT, D., SIMONS, D. J. & GRIMME, T., (2009), The relationship between visual attention and expertise in sports, *Psychology of Sport and Exercise*, 10 1, 146-151.
- MEYERHOFF, H. S. & PAPANMEIER, F., (2020), Individual differences in visual attention : A short, reliable, open-source, and multilingual test of multiple object tracking in PsychoPy, *Behavior Research Methods*, 52 6, 2556-2566.
- MEYERHOFF, H. S., PAPANMEIER, F. & HUFF, M., (2017), Studying visual attention using the multiple object tracking paradigm : A tutorial review, *Attention, Perception, & Psychophysics*, 79 5, 1255-1274.
- MEYERHOFF, H. S., PAPANMEIER, F., JAHN, G. & HUFF, M., (2016), Not FLEXible enough : Exploring the temporal dynamics of attentional reallocations with the multiple object tracking paradigm., *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 42 6, 776.

-
- MICHALSKI, S. C., SZPAK, A. & LOETSCHER, T., (2019), Using virtual environments to improve real-world motor skills in sports : a systematic review, *Frontiers in psychology*, 10, 2159.
- MILES, H. C., POP, S. R., WATT, S. J., LAWRENCE, G. P. & JOHN, N. W., (2012), A review of virtual environments for training in ball sports, *Computers & Graphics*, 36 6, 714-726.
- MILGRAM, P., TAKEMURA, H., UTSUMI, A. & KISHINO, F., (1995), Augmented reality : A class of displays on the reality-virtuality continuum, *Telemanipulator and tele-presence technologies*, 2351, 282-292.
- MOEN, F., HROZANOVA, M. & STILES, T., (2018), The effects of perceptual-cognitive training with Neurotracker on executive brain functions among elite athletes, *Cogent Psychology*, 5 1, 1544105.
- MÜLLER, S., DEKKER, E., MORRIS-BINELLI, K., PIGGOTT, B., HOYNE, G., CHRISTENSEN, W., FADDE, P., ZAICHKOWSKY, L., BRENTON, J. & HAMBRICK, D. Z., (2022), Attributes of Expert Anticipation Should Inform the Design of Virtual Reality Simulators to Accelerate Learning and Transfer of Skill, *Sports Medicine*, 1-9.
- MURR, D., LARKIN, P. & HÖNER, O., (2021), Decision-making skills of high-performance youth soccer players, *German Journal of Exercise and Sport Research*, 51 1, 102-111.
- MUSCULUS, L., LAUTENBACH, F., KNÖBEL, S., REINHARD, M. L., WEIGEL, P., GATZMAGA, N., BORCHERT, A. & PELKA, M., (2022), An assist for cognitive diagnostics in soccer : Two valid tasks measuring inhibition and cognitive flexibility in a soccer-specific setting with a soccer-specific motor response, *Frontiers in Psychology*, 1332.
- NEUMANN, D. L., MOFFITT, R. L., THOMAS, P. R., LOVEDAY, K., WATLING, D. P., LOMBARD, C. L., ANTONOVA, S. & TREMEER, M. A., (2018), A systematic review of the application of interactive virtual reality to sport, *Virtual Reality*, 22 3, 183-198.
- NORTH, J. S., HOPE, E. & WILLIAMS, A. M., (2016), The relative importance of different perceptual-cognitive skills during anticipation, *Human Movement Science*, 49, 170-177.
- NORTH, J. S., HOPE, E. & WILLIAMS, A. M., (2017), Identifying the micro-relations underpinning familiarity detection in dynamic displays containing multiple objects, *Frontiers in psychology*, 8, 963.

-
- NORTH, J. S., WARD, P., ERICSSON, A. & WILLIAMS, A. M., (2011), Mechanisms underlying skilled anticipation and recognition in a dynamic and temporally constrained domain, *Memory*, 192, 155-168.
- NORTH, J. S. & WILLIAMS, A. M., (2019), Familiarity detection and pattern perception. *Anticipation and decision making in sport* (p. 25-42), Routledge.
- NORTH, J. S., WILLIAMS, A. M., HODGES, N., WARD, P. & ERICSSON, K. A., (2009), Perceiving patterns in dynamic action sequences : Investigating the processes underpinning stimulus recognition and anticipation skill, *Applied Cognitive Psychology : The Official Journal of the Society for Applied Research in Memory and Cognition*, 236, 878-894.
- NUTHMANN, A., (2014), How do the regions of the visual field contribute to object search in real-world scenes ? Evidence from eye movements., *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 401, 342.
- OKSAMA, L. & HYÖNÄ, J., (2016), Position tracking and identity tracking are separate systems : Evidence from eye movements, *Cognition*, 146, 393-409.
- PASHLER, H., (1994), Dual-task interference in simple tasks : data and theory., *Psychological bulletin*, 1162, 220.
- PASTEL, S., CHEN, C., BÜRGER, D., NAUJOKS, M., MARTIN, L., PETRI, K. & WITTE, K., (2021), Spatial orientation in virtual environment compared to real-world, *Journal of Motor Behavior*, 536, 693-706.
- PASTEL, S., CHEN, C.-H., PETRI, K. & WITTE, K., (2020), Effects of body visualization on performance in head-mounted display virtual reality, *Plos one*, 159, e0239226.
- PASTEL, S., MARLOK, J., BANDOW, N. & WITTE, K., (2022), Application of eye-tracking systems integrated into immersive virtual reality and possible transfer to the sports sector-A systematic review, *Multimedia Tools and Applications*, 1-28.
- PETRI, K., BANDOW, N. & WITTE, K., (2018), Using several types of virtual characters in sports-a literature survey, *International Journal of Computer Science in Sport*, 171, 1-48.
- PIGGOTT, B., MÜLLER, S., CHIVERS, P., CRIPPS, A. & HOYNE, G., (2019), Small-sided games can discriminate perceptual-cognitive-motor capability and predict disposal efficiency in match performance of skilled Australian footballers, *Journal of sports sciences*, 3710, 1139-1145.

-
- PINDER, R. A., DAVIDS, K., RENSHAW, I. & ARAÚJO, D., (2011), Representative learning design and functionality of research and practice in sport, *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 331, 146-155.
- POTHIER, K., BENGUIGUI, N., KULPA, R. & CHAVOIX, C., (2015), Multiple object tracking while walking : similarities and differences between young, young-old, and old-old adults, *Journals of Gerontology Series B : Psychological Sciences and Social Sciences*, 706, 840-849.
- PYLYSHYN, Z. W. & STORM, R. W., (1988), Tracking multiple independent targets : Evidence for a parallel tracking mechanism, *Spatial vision*, 33, 179-197.
- QIU, F., PI, Y., LIU, K., LI, X., ZHANG, J. & WU, Y., (2018), Influence of sports expertise level on attention in multiple object tracking, *PeerJ*, 6, e5732.
- QIU, F., PI, Y., LIU, K., ZHU, H., LI, X., ZHANG, J. & WU, Y., (2019), Neural efficiency in basketball players is associated with bidirectional reductions in cortical activation and deactivation during multiple-object tracking task performance, *Biological Psychology*, 144, 28-36.
- REEP, C. & BENJAMIN, B., (1968), Skill and chance in association football, *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 1314, 581-585.
- REN, Y., WANG, C., ZHANG, L. & LU, A., (2022), The effects of visual cognitive tasks on landing stability and lower extremity injury risk in high-level soccer players, *Gait & Posture*, 92, 230-235.
- RICHLAN, F., WEISS, M., KASTNER, P. & BRAID, J., (2022), Virtual training, real effects : A systematic literature review on sports performance enhancement through interventions in virtual reality.
- ROCA, A., FORD, P. R., MCROBERT, A. P. & WILLIAMS, A. M., (2011), Identifying the processes underpinning anticipation and decision-making in a dynamic time-constrained task, *Cognitive processing*, 123, 301-310.
- ROCA, A., FORD, P. R., MCROBERT, A. P. & WILLIAMS, A. M., (2013), Perceptual-cognitive skills and their interaction as a function of task constraints in soccer., *Journal of sport & exercise psychology*, 352.
- ROCA, A., FORD, P. R. & MEMMERT, D., (2018), Creative decision making and visual search behavior in skilled soccer players, *PloS one*, 137, e0199381.
- ROCA, A., FORD, P. R. & MEMMERT, D., (2021), Perceptual-cognitive processes underlying creative expert performance in soccer, *Psychological Research*, 853, 1146-1155.

-
- ROJAS FERRER, C. D., SHISHIDO, H., KITAHARA, I. & KAMEDA, Y., (2020), Read-the-game : System for skill-based visual exploratory activity assessment with a full body virtual reality soccer simulation, *PloS one*, 15 3, e0230042.
- ROMEAS, T., CHAUMILLON, R., LABBÉ, D. & FAUBERT, J., (2019), Combining 3D-MOT with sport decision-making for perceptual-cognitive training in virtual reality, *Perceptual and Motor Skills*, 126 5, 922-948.
- ROMEAS, T., GULDNER, A. & FAUBERT, J., (2016), 3D-Multiple Object Tracking training task improves passing decision-making accuracy in soccer players, *Psychology of Sport and Exercise*, 22, 1-9.
- SALVUCCI, D. D. & GOLDBERG, J. H., (2000), Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols, *Proceedings of the 2000 symposium on Eye tracking research & applications*, 71-78.
- SARMENTO, H., ANGUERA, M. T., PEREIRA, A. & ARAÚJO, D., (2018), Talent identification and development in male football : A systematic review, *Sports medicine*, 48 4, 907-931.
- 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.
- SCHAEFER, S., (2014), The ecological approach to cognitive-motor dual-tasking : findings on the effects of expertise and age, *Frontiers in psychology*, 5, 1167.
- SCHAEFER, S. & SCORNAIENCHI, D., (2020), Table tennis experts outperform novices in a demanding cognitive-motor dual-task situation, *Journal of motor behavior*, 52 2, 204-213.
- SCHARFEN, H.-E. & MEMMERT, D., (2019), Measurement of cognitive functions in experts and elite athletes : A meta-analytic review, *Applied Cognitive Psychology*, 33 5, 843-860.
- SCHARFEN, H.-E. & MEMMERT, D., (2021), Cognitive training in elite soccer players : evidence of narrow, but not broad transfer to visual and executive function, *German Journal of Exercise and Sport Research*, 51 2, 135-145.
- SCHMIT, C. & BRISSWALTER, J., (2020), Executive functioning during prolonged exercise : a fatigue-based neurocognitive perspective, *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 13 1, 21-39.
- SCHUMACHER, N., SCHMIDT, M., WELLMANN, K. & BRAUMANN, K.-M., (2018), General perceptual-cognitive abilities : Age and position in soccer, *PloS one*, 13 8, e0202627.

-
- SEKULER, R., McLAUGHLIN, C. & YOTSUMOTO, Y., (2008), Age-related changes in attentional tracking of multiple moving objects, *Perception*, 376, 867-876.
- SHEN, J., MACK, M. L. & PALMERI, T. J., (2014), Studying real-world perceptual expertise, *Frontiers in Psychology*, 5, 857.
- SHIM, W. M., ALVAREZ, G. A. & JIANG, Y. V., (2008), Spatial separation between targets constrains maintenance of attention on multiple objects, *Psychonomic bulletin & review*, 152, 390-397.
- SIMONS, D. J., BOOT, W. R., CHARNESSE, N., GATHERCOLE, S. E., CHABRIS, C. F., HAMBRICK, D. Z. & STINE-MORROW, E. A., (2016), Do “brain-training” programs work?, *Psychological Science in the Public Interest*, 173, 103-186.
- SIMONS, D. J. & CHABRIS, C. F., (1999), Gorillas in our midst : Sustained inattentional blindness for dynamic events, *perception*, 289, 1059-1074.
- SLATER, M., (2009), Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments, *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 364 1535, 3549-3557.
- SLATER, M. & SANCHEZ-VIVES, M. V., (2016), Enhancing our lives with immersive virtual reality, *Frontiers in Robotics and AI*, 3, 74.
- SLATER, M. & WILBUR, S., (1997), A framework for immersive virtual environments (FIVE) : Speculations on the role of presence in virtual environments, *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 66, 603-616.
- SMEETON, N. J., HÜTTERMANN, S. & WILLIAMS, A. M., (2019), Postural cues, biological motion perception, and anticipation in sport, *Anticipation and decision making in sport*, 3-24.
- SMEETON, N. J., WARD, P. & WILLIAMS, A. M., (2004), Do pattern recognition skills transfer across sports? A preliminary analysis, *Journal of Sports Sciences*, 222, 205-213.
- SMITH, M. R., THOMPSON, C., MARCORA, S. M., SKORSKI, S., MEYER, T. & COUTTS, A. J., (2018), Mental fatigue and soccer : current knowledge and future directions, *Sports Medicine*, 487, 1525-1532.
- STEIN, J.-P. & OHLER, P., (2017), Venturing into the uncanny valley of mind—The influence of mind attribution on the acceptance of human-like characters in a virtual reality setting, *Cognition*, 160, 43-50.
- STEUER, J., (1992), Defining virtual reality : Dimensions determining telepresence, *Journal of communication*, 424, 73-93.

-
- STRAYER, D. L. & JOHNSTON, W. A., (2001), Driven to distraction : Dual-task studies of simulated driving and conversing on a cellular telephone, *Psychological science*, 126, 462-466.
- SUTHERLAND, I. E., (1968), A head-mounted three dimensional display, *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I*, 757-764.
- SWANN, C., MORAN, A. & PIGGOTT, D., (2015), Defining elite athletes : Issues in the study of expert performance in sport psychology, *Psychology of sport and exercise*, 16, 3-14.
- THOMAS, L. E. & SEIFFERT, A. E., (2010), Self-motion impairs multiple-object tracking, *Cognition*, 1171, 80-86.
- TOMBU, M. & SEIFFERT, A. E., (2008), Attentional costs in multiple-object tracking, *Cognition*, 1081, 1-25.
- TOMBU, M. & SEIFFERT, A. E., (2011), Tracking planets and moons : Mechanisms of object tracking revealed with a new paradigm, *Attention, Perception, & Psychophysics*, 733, 738-750.
- TRAVASSOS, B., ARAUJO, D., DAVIDS, K., O'HARA, K., LEITÃO, J. & CORTINHAS, A., (2013), Expertise effects on decision-making in sport are constrained by requisite response behaviours—A meta-analysis, *Psychology of Sport and Exercise*, 142, 211-219.
- TRICK, L. M., JASPERS-FAYER, F. & SETHI, N., (2005), Multiple-object tracking in children : The “Catch the Spies” task, *Cognitive Development*, 203, 373-387.
- TURNBULL, P. R., KHANAL, S. & DAKIN, S. C., (2021), The effect of cellphone position on driving and gaze behaviour, *Scientific reports*, 111, 1-10.
- VAEYENS, R., LENOIR, M., WILLIAMS, A. M., MAZYN, L. & PHILIPPAERTS, R. M., (2007a), The effects of task constraints on visual search behavior and decision-making skill in youth soccer players, *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 292, 147-169.
- VAEYENS, R., LENOIR, M., WILLIAMS, A. M. & PHILIPPAERTS, R. M., (2007b), Mechanisms underpinning successful decision making in skilled youth soccer players : An analysis of visual search behaviors, *Journal of motor behavior*, 395, 395-408.
- VAN BIESEN, D., JACOBS, L., MCCULLOCH, K., JANSSENS, L. & VANLANDEWIJCK, Y. C., (2018), Cognitive-motor dual-task ability of athletes with and without intellectual impairment, *Journal of sports sciences*, 365, 513-521.

-
- van MAARSEVEEN, M. J., OUDEJANS, R. R., MANN, D. L. & SAVELSBERGH, G. J., (2018), Perceptual-cognitive skill and the in situ performance of soccer players, *Quarterly journal of experimental psychology*, 71 2, 455-470.
- van MAARSEVEEN, M. J., OUDEJANS, R. R. & SAVELSBERGH, G. J., (2015), Pattern recall skills of talented soccer players : Two new methods applied, *Human movement science*, 41, 59-75.
- VARTANIAN, O., COADY, L. & BLACKLER, K., (2016), 3D multiple object tracking boosts working memory span : Implications for cognitive training in military populations, *Military Psychology*, 28 5, 353-360.
- VARTANIAN, O., STOKES-HENDRIKS, T., KING, K., RICE, E. & FORBES, S., (2021), 3D Multiple Object Tracking or Adaptive Dual n-back Training Boosts Simple Verbal Working Memory Span but Not Multitasking Performance in Military Participants, *Journal of Cognitive Enhancement*, 5 3, 280-295.
- VATER, C., KLOSTERMANN, A., KREDEL, R. & HOSSNER, E.-J., (2019), The role of peripheral vision in sports and everyday life. *Anticipation and decision making in sport* (p. 79-98), Routledge.
- VATER, C., KREDEL, R. & HOSSNER, E.-J., (2017a), Disentangling vision and attention in multiple-object tracking : How crowding and collisions affect gaze anchoring and dual-task performance, *Journal of vision*, 17 5, 21-21.
- VATER, C., KREDEL, R. & HOSSNER, E.-J., (2017b), Examining the functionality of peripheral vision : From fundamental understandings to applied sport science, *Current Issues in Sport Science*, 2010.
- VATER, C., WILLIAMS, A. M. & HOSSNER, E.-J., (2020), What do we see out of the corner of our eye ? The role of visual pivots and gaze anchors in sport, *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 13 1, 81-103.
- 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., REINEBO, G., MAUREX, L., INGVAR, M. & PETROVIC, P., (2017), Core executive functions are associated with success in young elite soccer players, *PloS one*, 12 2, e0170845.
- VIGNAIS, N., KULPA, R., BRAULT, S., PRESSE, D. & BIDEAU, B., (2015), Which technology to investigate visual perception in sport : Video vs. virtual reality, *Human movement science*, 39, 12-26.

-
- VINE, S. J., MCGRATH, J. S., BRIGHT, E., DUTTON, T., CLARK, J. & WILSON, M. R., (2014), Assessing visual control during simulated and live operations : gathering evidence for the content validity of simulation using eye movement metrics, *Surgical endoscopy*, 28 6, 1788-1793.
- 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 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 and exercise psychology*, 25 1, 93-111.
- WICKENS, C. D., (2002), Multiple resources and performance prediction, *Theoretical issues in ergonomics science*, 3 2, 159-177.
- WILLIAMS, A. M., (2000), Perceptual skill in soccer : Implications for talent identification and development, *Journal of sports sciences*, 18 9, 737-750.
- WILLIAMS, A. M. & DAVIDS, K., (1995), Declarative knowledge in sport : A by-product of experience or a characteristic of expertise?, *Journal of sport and exercise psychology*, 17 3, 259-275.
- WILLIAMS, A. M., DAVIDS, K., BURWITZ, L. & WILLIAMS, J. G., (1994), Visual search strategies in experienced and inexperienced soccer players, *Research quarterly for exercise and sport*, 65 2, 127-135.
- WILLIAMS, A. M. & ERICSSON, K. A., (2005), Perceptual-cognitive expertise in sport : Some considerations when applying the expert performance approach, *Human movement science*, 24 3, 283-307.
- 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, A. M., NORTH, J. S. & HOPE, E. R., (2012), Identifying the mechanisms underpinning recognition of structured sequences of action, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65 10, 1975-1992.
- WILLIAMS, A. M., WARD, J. D., WARD, P. & SMEETON, N. J., (2008), Domain specificity, task specificity, and expert performance, *Research quarterly for exercise and sport*, 79 3, 428-433.
- WIRTH, M., GRADL, S., POIMANN, D., SCHAEFKE, H., MATLOK, J., KOERGER, H. & ESKOFIER, B. M., (2018), Assessment of perceptual-cognitive abilities among ath-

-
- letes in virtual environments : Exploring interaction concepts for soccer players, *Proceedings of the 2018 Designing Interactive Systems Conference*, 1013-1023.
- WOOD, G., WRIGHT, D. J., HARRIS, D., PAL, A., FRANKLIN, Z. C. & VINE, S. J., (2021), Testing the construct validity of a soccer-specific virtual reality simulator using novice, academy, and professional soccer players, *Virtual Reality*, 25 1, 43-51.
- WOOLLACOTT, M. & SHUMWAY-COOK, A., (2002), Attention and the control of posture and gait : a review of an emerging area of research, *Gait & posture*, 16 1, 1-14.
- XIE, B., LIU, H., ALGHOFAILI, R., ZHANG, Y., JIANG, Y., LOBO, F. D., LI, C., LI, W., HUANG, H., AKDERE, M. et al., (2021), A review on virtual reality skill training applications, *Frontiers in Virtual Reality*, 2, 645153.
- YANTIS, S., (1992), Multielement visual tracking : Attention and perceptual organization, *Cognitive psychology*, 24 3, 295-340.
- ZELINSKY, G. J. & NEIDER, M. B., (2008), An eye movement analysis of multiple object tracking in a realistic environment, *Visual Cognition*, 16 5, 553-566.
- ZELINSKY, G. J. & TODOR, A., (2010), The role of “rescue saccades” in tracking objects through oclusions, *Journal of Vision*, 10 14, 29-29.
- 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 3, 747-756.
- ZHANG, Y., LU, Y., WANG, D., ZHOU, C. & XU, C., (2021), Relationship between individual alpha peak frequency and attentional performance in a multiple object tracking task among ice-hockey players, *Plos one*, 16 5, e0251443.
- ZWIERKO, T., LESIAKOWSKI, P., REDONDO, B. & VERA, J., (2022), Examining the ability to track multiple moving targets as a function of postural stability : a comparison between team sports players and sedentary individuals, *PeerJ*, 10, e13964.

Etude 1 - Tests d'association par condition expérimentale

TABLE A1: Description des tests d'association des 11 variables par cluster dans la condition STRU.

Le v.test est un indicateur statistique de la différence entre la moyenne du cluster et la moyenne globale pour la variable correspondante. La valeur p associée indique si la moyenne du cluster est significativement différente de la moyenne globale.

| Variable | v.test | Moyenne | SD | p.value | Cluster |
|----------------|--------|---------|-------|---------|---------|
| Ind.DistTarget | 6.223 | 1.797 | 1.116 | <0.001 | 1 |
| Ratio.NoTeam | -3.925 | -1.133 | 0.450 | <0.001 | 1 |
| Ratio.Team | -3.501 | -1.011 | 0.661 | <0.001 | 1 |
| Ratio.Socc | -3.248 | -0.938 | 1.128 | 0.001 | 1 |
| Ind.DensityCol | -2.787 | -0.804 | 0.745 | 0.005 | 1 |
| Grp.Disp | -2.465 | -0.712 | 0.768 | 0.014 | 1 |
| Grp.Density | -2.344 | -0.677 | 0.872 | 0.019 | 1 |
| Grp.Speed | 2.183 | 0.630 | 1.036 | 0.029 | 1 |
| Ind.Speed | -2.002 | -0.578 | 0.516 | 0.045 | 1 |
| Grp.DensityCol | -0.452 | -0.131 | 0.525 | 0.651 | 1 |
| Ind.Density | 0.121 | 0.035 | 1.055 | 0.904 | 1 |
| Grp.Density | 4.943 | 1.058 | 0.600 | <0.001 | 2 |
| Grp.DensityCol | 4.883 | 1.045 | 0.928 | <0.001 | 2 |
| Grp.Disp | -3.121 | -0.668 | 0.396 | 0.002 | 2 |

| Variable | v.test | Moyenne | SD | p.value | Cluster |
|----------------|--------|---------|-------|---------|---------|
| Ind.Density | 3.026 | 0.648 | 0.910 | 0.002 | 2 |
| Ind.DensityCol | 2.716 | 0.581 | 0.892 | 0.007 | 2 |
| Ind.DistTarget | -2.348 | -0.503 | 0.362 | 0.019 | 2 |
| Ratio.Team | -2.341 | -0.501 | 1.047 | 0.019 | 2 |
| Ratio.Socc | -2.146 | -0.459 | 0.837 | 0.032 | 2 |
| Ratio.NoTeam | -1.258 | -0.269 | 0.999 | 0.209 | 2 |
| Grp.Speed | 0.878 | 0.188 | 0.677 | 0.380 | 2 |
| Ind.Speed | -0.643 | -0.138 | 0.538 | 0.521 | 2 |
| Ratio.Team | 4.722 | 0.533 | 0.623 | <0.001 | 3 |
| Grp.Disp | 4.639 | 0.524 | 0.925 | <0.001 | 3 |
| Ratio.Socc | 4.358 | 0.492 | 0.657 | <0.001 | 3 |
| Ratio.NoTeam | 4.074 | 0.460 | 0.764 | <0.001 | 3 |
| Grp.DensityCol | -4.017 | -0.453 | 0.724 | <0.001 | 3 |
| Ind.Density | -2.791 | -0.315 | 0.849 | 0.005 | 3 |
| Grp.Density | -2.648 | -0.299 | 0.769 | 0.008 | 3 |
| Ind.DistTarget | -2.586 | -0.292 | 0.393 | 0.010 | 3 |
| Grp.Speed | -2.425 | -0.274 | 0.998 | 0.015 | 3 |
| Ind.Speed | 2.079 | 0.235 | 1.166 | 0.038 | 3 |
| Ind.DensityCol | -0.328 | -0.037 | 0.920 | 0.743 | 3 |

TABLE A2: **Description des tests d'association des 11 variables par cluster dans la condition UNS-TRU.** Le v.test est un indicateur statistique de la différence entre la moyenne du cluster et la moyenne globale pour la variable correspondante. La valeur p associée indique si la moyenne du cluster est significativement différente de la moyenne globale.

| Variable | v.test | Moyenne | SD | p.value | Cluster |
|---------------------|--------|---------|-------|---------|---------|
| Ratio.Socc | -5.217 | -1.422 | 0.989 | <0.001 | 3 |
| Ratio.Team | -5.182 | -1.412 | 0.754 | <0.001 | 3 |
| Ratio.NoTeam | -4.707 | -1.282 | 0.749 | <0.001 | 3 |

| Variable | v.test | Moyenne | SD | p.value | Cluster |
|-----------------------|--------|---------|-------|---------|---------|
| Grp.DensityCol | 2.682 | 0.731 | 0.672 | 0.007 | 3 |
| Grp.Speed | 2.436 | 0.664 | 0.925 | 0.015 | 3 |
| Grp.Density | 1.937 | 0.528 | 0.978 | 0.053 | 3 |
| Ind.DensityCol | 1.492 | 0.406 | 0.845 | 0.136 | 3 |
| Grp.Disp | -1.378 | -0.375 | 0.756 | 0.168 | 3 |
| Ind.Speed | 1.098 | 0.299 | 0.885 | 0.272 | 3 |
| Ind.DistTarget | 1.066 | 0.290 | 0.948 | 0.286 | 3 |
| Ind.Density | 0.936 | 0.255 | 0.611 | 0.349 | 3 |
| Grp.Density | 3.607 | 0.570 | 0.788 | <0.001 | 2 |
| Grp.Disp | -3.373 | -0.533 | 0.731 | 0.001 | 2 |
| Ind.DistTarget | -3.168 | -0.501 | 0.687 | 0.002 | 2 |
| Grp.Speed | 3.023 | 0.478 | 0.787 | 0.003 | 2 |
| Ratio.NoTeam | 2.649 | 0.419 | 0.755 | 0.008 | 2 |
| Ind.Density | 2.130 | 0.337 | 1.117 | 0.033 | 2 |
| Ratio.Socc | 2.014 | 0.319 | 0.580 | 0.044 | 2 |
| Ratio.Team | 1.753 | 0.277 | 0.706 | 0.080 | 2 |
| Grp.DensityCol | 1.037 | 0.164 | 0.965 | 0.300 | 2 |
| Ind.Speed | 0.414 | 0.066 | 1.086 | 0.679 | 2 |
| Ind.DensityCol | 0.044 | 0.007 | 0.943 | 0.965 | 2 |
| Grp.Density | -5.105 | -0.780 | 0.548 | <0.001 | 1 |
| Grp.Speed | -4.916 | -0.751 | 0.642 | <0.001 | 1 |
| Grp.Disp | 4.433 | 0.677 | 0.896 | <0.001 | 1 |
| Grp.DensityCol | -3.136 | -0.479 | 0.882 | 0.002 | 1 |
| Ind.Density | -2.851 | -0.435 | 0.819 | 0.004 | 1 |
| Ratio.Team | 2.324 | 0.355 | 0.745 | 0.020 | 1 |
| Ind.DistTarget | 2.311 | 0.353 | 1.053 | 0.021 | 1 |
| Ratio.Socc | 2.093 | 0.320 | 0.720 | 0.036 | 1 |
| Ind.Speed | -1.274 | -0.195 | 0.896 | 0.203 | 1 |
| Ind.DensityCol | -1.214 | -0.185 | 1.042 | 0.225 | 1 |
| Ratio.NoTeam | 1.062 | 0.162 | 0.805 | 0.288 | 1 |

Etude 2 - Données sur le temps de séjour par AOI.

TABLE A3: Temps de séjour moyen (et déviation standard) par groupe, condition et AOI.

| AOI | Cluster | Groupe | Moyenne | SD |
|----------|---------|---------|---------|-------|
| Centroid | 1 | control | 0.271 | 0.159 |
| Centroid | 1 | soccer | 0.362 | 0.179 |
| Centroid | 2 | control | 0.787 | 0.364 |
| Centroid | 2 | soccer | 0.646 | 0.276 |
| Centroid | 3 | control | 0.692 | 0.166 |
| Centroid | 3 | soccer | 0.803 | 0.276 |
| Other | 1 | control | 4.650 | 0.523 |
| Other | 1 | soccer | 4.307 | 0.614 |
| Other | 2 | control | 4.061 | 0.557 |
| Other | 2 | soccer | 3.484 | 0.778 |
| Other | 3 | control | 3.802 | 0.458 |
| Other | 3 | soccer | 3.278 | 0.290 |
| R1 | 1 | control | 1.206 | 0.487 |
| R1 | 1 | soccer | 1.380 | 0.409 |
| R1 | 2 | control | 1.805 | 0.780 |
| R1 | 2 | soccer | 2.662 | 0.786 |
| R1 | 3 | control | 2.154 | 0.630 |
| R1 | 3 | soccer | 2.649 | 0.550 |
| R2 | 1 | control | 1.206 | 0.420 |
| R2 | 1 | soccer | 1.289 | 0.475 |
| R2 | 2 | control | 1.187 | 0.456 |
| R2 | 2 | soccer | 1.703 | 0.529 |
| R2 | 3 | control | 1.678 | 0.380 |
| R2 | 3 | soccer | 1.923 | 0.373 |
| R3 | 1 | control | 1.311 | 0.383 |
| R3 | 1 | soccer | 1.312 | 0.495 |
| R3 | 2 | control | 1.274 | 0.436 |
| R3 | 2 | soccer | 1.034 | 0.483 |

| AOI | Cluster | Groupe | Moyenne | SD |
|-----|---------|---------|---------|-------|
| R3 | 3 | control | 0.996 | 0.255 |
| R3 | 3 | soccer | 1.036 | 0.216 |
| R4 | 1 | control | 0.687 | 0.278 |
| R4 | 1 | soccer | 0.676 | 0.313 |
| R4 | 2 | control | 0.528 | 0.196 |
| R4 | 2 | soccer | 0.434 | 0.212 |
| R4 | 3 | control | 0.452 | 0.208 |
| R4 | 3 | soccer | 0.355 | 0.105 |

TABLE A4 – Résultats des tests post-hoc sur les effets d’interaction entre les facteurs cluster et AOI.

| AOI | Comparaison | p.value |
|----------|---|---------------|
| Centroid | Cluster 1 < Cluster 2 & Cluster 3 | <.001 |
| Centroid | Cluster 2 = Cluster 3 | 0.822 |
| Other | Cluster 1 > Cluster 2 & Cluster 3 | <.001 |
| Other | Cluster 2 = Cluster 3 | 0.445 |
| R1 | Cluster 1 < Cluster 2 & Cluster 3 | <.001 |
| R1 | Cluster 2 = Cluster 3 | 0.251 |
| R2 | Cluster 1 & Cluster 2 < Cluster 3 | <.001 & 0.002 |
| R2 | Cluster 1 = Cluster 2 | 0.189 |
| R3 | Cluster 1 > Cluster 3 | 0.019 |
| R3 | Cluster 1 = Cluster 2 & Cluster 2 = Cluster 3 | 0.239 & 0.521 |
| R4 | Cluster 1 > Cluster 2 & Cluster 3 | 0.017 & <.001 |
| R4 | Cluster 2 = Cluster 3 | 0.461 |

Titre : Mesure de l'attention visuelle au football : contextualisation des contraintes d'évaluation en réalité virtuelle

Mot clés : Football, Performance, Attention Visuelle, Suivi Visuel, Réalité Virtuelle

Résumé : Au football, un joueur doit partager son attention visuelle entre le ballon, ses partenaires et ses adversaires pour être performant. Cette capacité est traditionnellement évaluée via une tâche de suivi visuel d'objets multiples qui consiste à suivre des objets cibles se déplaçant aléatoirement parmi des objets perturbateurs de même apparence. L'objectif de cette thèse est de contextualiser cette tâche générique aux contraintes spécifiques du football. À cette fin, une double-tâche est réalisée en réalité virtuelle et est couplée à des données de match utilisées pour animer les joueurs. Des sujets sont comparés en fonction de leur niveau de pratique

au football dans cette tâche de suivi visuel de joueurs perçus selon le point de vue d'un défenseur ou d'un gardien sur un terrain virtuel. Les résultats montrent des différences entre des pratiquants et des non-pratiquants, mais pas entre des joueurs de niveau régional et national. De plus, les écarts de performances liés au niveau de pratique ne sont pas plus importants dans les conditions les plus représentatives du football. En conclusion, ces travaux contribuent à la réflexion autour du besoin et de la manière de contextualiser les mesures perceptivo-cognitives pour les rendre pertinentes dans le développement de la performance sportive.

Title: Measuring visual attention in soccer: contextualizing assessment constraints in virtual reality

Keywords: Soccer (Football), Performance, Visual Attention, Visual Tracking, Virtual Reality

Abstract: Visual attention must be properly allocated between the ball, teammates and opponents to perform in soccer. This ability is traditionally assessed using the multiple object tracking task, which involves tracking target objects moving randomly among disruptive objects of similar appearance. The objective of this thesis is to contextualize this generic task to the specific constraints of soccer. To this end, a dual task is performed in virtual reality and is coupled with real game data to animate the players. Depending on their level of soccer practice, participants are compared in this visual tracking task of virtual

players perceived from the perspective of a defender or a goalkeeper on a virtual field. The results show differences between soccer players and non-soccer players, but not between regional and national players. In addition, differences in performance related to level of practice are not more important in the most representative conditions of soccer. In conclusion, this work contributes to the reasoning about the need and the way to contextualize perceptual-cognitive measures to make them relevant in the development of sport performance.