



HAL
open science

Analyse en réalité virtuelle de la coopération lors d'une interception de balle : interaction et interférence

Charles Faure

► **To cite this version:**

Charles Faure. Analyse en réalité virtuelle de la coopération lors d'une interception de balle : interaction et interférence. Education. Université Rennes 2, 2019. Français. NNT : 2019REN20038 . tel-02650035

HAL Id: tel-02650035

<https://theses.hal.science/tel-02650035>

Submitted on 29 May 2020

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.

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE RENNES 2

COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 603

Education, Langages, Interaction, Cognition, Clinique

Spécialité : STAPS

Par

Charles FAURE

Analyse en réalité virtuelle de la coopération lors d'une interception de balle : interaction et interférence

Thèse présentée et soutenue à l'Université Rennes, le 17 décembre 2019

Unité de recherche : Inria, M2S – EA 7470

Composition du jury

Rapporteurs :

Mme Maud MARCHAL
M Daniel MESTRE

Maître de Conférences HDR – INSA-IRISA Rennes
Directeur de recherche CNRS – Aix-Marseille Univ.

Examineurs :

Mme Camille JEUNET
M Régis THOUVARECQ

Chargée de recherche CNRS – Univ. Toulouse
Professeur des Universités – Univ. Rouen

Dir. de thèse :

M Benoît BIDEAU

Professeur des Universités – Univ. Rennes

Co-dir. de thèse :

M Richard KULPA

Maître de Conférences HDR – Univ. Rennes

Membre invité :

M Nicolas VIGNAIS

Maître de Conférences, Univ – Paris-Sud

À mon père, Jean-Michel. Pour avoir toujours été un exemple d'intelligence, de générosité et d'intégrité morale.

À ma femme, Julie. Pour avoir réussi à concentrer autant de qualités dans un si petit espace corporel.

*"Et puis on dit toujours les sportifs c'est des cons, bon. Mais c'est l'esprit d'équipe!
C'est des mecs ils sont une équipe, y'a un esprit! Alors, ils partagent."*

Michel Colucci, dit Coluche - *J'ai pas dit ça sur les sportifs* (1977)

Remerciements

Pierre Desproges, dans son spectacle au théâtre Fontaine (1984), disait que *"tout dans la vie est affaire de choix. C'est vrai, ça commence par la tétine ou le téton, ça se termine par le chêne ou le sapin. Et puis finalement, d'ici à là, de sa naissance à sa mort, l'Homme est en permanence confronté à des choix! Mais que choisir?"*. Rien ne pourrait mieux résumer ma pensée, ma façon d'aborder mon travail, et de manière plus générale, ma vie quotidienne. Cette thèse elle-même repose sur une multitude de choix, certains faciles, d'autres plus difficiles. Ici, je souhaiterais remercier les personnes qui, de près ou de loin, hier ou aujourd'hui, m'ont accompagné dans ces choix. N'étant pas très doué pour dire les choses, ne m'en veuillez pas trop si mes mots vous arrivent aux yeux plutôt qu'aux oreilles.

Pour commencer par l'aspect le plus formel, mais essentiel, je souhaiterais remercier ici les membres de mon jury, et tout d'abord Maud Marchal et Daniel Mestre qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse, une tâche que j'imagine toujours difficile à réaliser. De même, je remercie Camille Jeunet et Régis Thouvarcq d'avoir accepté d'être examinateurs de ce travail, mais également Nicolas Vignais, pour avoir bien voulu apporter leur regard expert à mon travail. Je remercie également l'École Normale Supérieure Rennes, qui m'a permis de poursuivre mes études dans les meilleures conditions, et m'a permis le financement de ce doctorat. Mes années passées en son sein auront été des plus heureuses, je ne les oublierai pas. Je souhaite également remercier les structures qui m'ont accueilli et accompagné durant cette thèse, le laboratoire M2S, l'équipe MimeTIC de l'INRIA Rennes, et l'Université Rennes 2.

Je remercie également mon directeur de thèse, Benoit, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire M2S, et offert des conditions de travail idéales. Je te remercie pour l'intérêt que tu as porté à ce sujet, ce travail, et la production qui en a découlé. Merci également de m'avoir fait confiance dans mon approche et mes choix, tout au long de la thèse.

Je remercie aussi tout particulièrement mon co-encadrant, Richard, capitaine de ce navire de thèse, toi qui, lorsque la tempête a grondé, a réussi à tenir la barre, afin qu'il ne Kulpa. Tu as su habilement jongler avec mon caractère que je sais particulier (têtu?...), tu as su t'adapter à mes volontés, mes humeurs, mes doutes, et être présent lorsque j'ai eu besoin de toi, malgré toutes tes contraintes. Tu m'as fait confiance, dès le début de ce travail, alors que nous nous connaissions à peine. Tu as accepté de "partir à l'aventure" avec moi, et je sais aujourd'hui que j'ai non

seulement gagné un compagnon de voyage, mais également un ami. Pour ça, et pour tout le reste, je te remercie, et te serai à jamais reconnaissant.

Sans ordre particulier, je tiens à remercier toutes les personnes avec qui j'ai pu travailler de près ou de loin, qui m'ont permis de construire mon travail et mon projet. Je souhaite donc remercier Vincent Martin et Sébastien Ratel, du laboratoire AME2P de Clermont-Ferrand. Après avoir été les premiers à m'offrir l'opportunité de découvrir le monde de la recherche en licence, vous m'avez accueilli dans les meilleures conditions pour travailler ensemble, ainsi qu'avec Sebastian Garcia-Vicencio, lors de mon M2. Dans ce même laboratoire, je souhaite également remercier Brice Biancarelli, Elodie Chaplais et David Thivel, pour leur bonne humeur et leur amitié. Une pensée particulière pour Sébastien Brault et Caroline Martin, qui ont été les premiers à porter un regard critique sur mon travail, et à m'accompagner dans sa réalisation, lors de mes premières années à l'ENS. Merci également à Ian Kenny, de l'Université de Limerick, ainsi qu'à Sarah Lamb, Christopher Byrne et David Keene, de l'Université d'Oxford, pour le travail (et les bières!) partagé(es) ensemble. À Quentin Petit et Florian Nouviale, de l'IRISA Rennes, pour leur aide indispensable dans la partie technologique de cette thèse, aide sans laquelle rien n'aurait été possible.

Au cours de mes années de thèse, j'ai également pu découvrir sous un autre angle des gens qui, de professeurs, sont devenus collègues puis amis : toute l'équipe du département 2SEP. À Jacques, car tu m'as un jour donné ma chance de prouver ma valeur. Je n'oublierai pas ça. À Kiki, car tu es de ceux qui savent transmettre simplement et avec passion le savoir qui les anime. J'aurai toujours la plus grande admiration pour ton engagement et ton abnégation sans pareils. À Jean-Nic', car la complexité de ta pensée fonde indéniablement ta richesse. J'ai toujours eu plaisir à m'ouvrir l'esprit à tes côtés. À Patricia, car tu m'a toujours donné le sourire, par ta bonne humeur et ta curiosité pour toute chose. Ta simplicité est à mes yeux une vertu précieuse. À Alexis, car tu sais habilement mêler et gérer la rigueur et la pitrerie. Ce côté "Docteur Jekyll et M. Hyde" est, pour moi, un équilibre que chacun devrait chercher à atteindre. À l'ensemble des moniteurs et monitrices, et aux ATER successifs, car le travail est toujours plus simple et agréable lorsqu'il est réalisé ensemble.

Le laboratoire M2S fut pour moi un lieu de vie particulier, où j'ai toujours mis les pieds avec plaisir. Cette ambiance, je la dois en grande partie à mes collègues, tous autant qu'ils sont, et si donner tous les détails serait trop long, je souhaite en particulier remercier Hugo (pour ta pertinence et ton amitié), Anne-Hélène (pour ta gentillesse et ta simplicité), Armel (pour ta droiture et ton humour) et Antho (pour

ta compétence et ta disponibilité). Évidemment, la vie de bureau ne serait pas la même sans les autres thésards, que je remercie donc pour ces belles années et ces excellents moments, pas toujours très intelligents mais toujours divertissants. Tout particulièrement, merci à Kévin, mon "b'let", avec qui nous avons commencé à partager un bureau il y a bien des années (en licence ? Master ? Je ne me souviens même plus !), pour ne (presque) plus nous quitter. Je sais que tu iras loin (scientifiquement et géographiquement) dans tes projets, je suivrai ton parcours avec intérêt, et je te remercie pour ces années passées, et celles à venir. Et un jour, j'en suis persuadé, tu auras "la clé du mystère". Un merci tout particulier aussi à Seb' : après tout ce temps passé à raconter des conneries ensemble, il était presque inéluctable de soutenir nos thèses respectives le même jour ! Enfin, et non la moindre, à Suzy, l'amie du premier instant, avec qui tout n'est qu'évidence et simplicité. Tu m'as accompagné, porté, motivé, soutenu en toutes circonstances. Il est rare de voir une amitié n'ayant jamais tressailli, et je suis fier de pouvoir dire que la nôtre est de celles-là.

Puisque l'on a attaqué le "quart d'heure émotion" des amitiés, je me dois ici d'en aborder quelques-unes, parfois regroupées, et ô combien sincères. À Lélé, pour ton soutien et ton amitié sans faille. Savoir que j'ai toujours quelqu'un sur qui compter est une grande force pour moi. À Yannou, parce que nous partageons une certaine vision de la vie et des relations humaines. D'une manière ou d'une autre, nos avenir auront des choses en commun. À Roro et Nathan, pour mes meilleures années rennaises à vos côtés, la franchise de nos relations, et le nombre incalculable de pintes ingurgitées. Les années à venir seront, j'en suis persuadé, axées sur cette même spontanéité. À Antoine, pour l'évolution naturelle de notre amitié, car non, il n'y a finalement pas que la fête qui nous rassemble, mais aussi beaucoup de valeurs. À Camille, pour avoir été (et être toujours !) un exemple d'intelligence ayant su garder toute sa simplicité. Et c'est promis, je viendrai bientôt à Bordeaux ! À Pierrick et Simon, car discuter et débattre avec chacun de vous est toujours un plaisir, quel que soit le sujet. À Annabelle, cette thèse aurait aussi bien pu être la tienne, et tu la défendrais probablement même mieux que moi ! Ton travail et surtout ton amitié m'ont toujours été très précieux. Je serais à tes côtés pour ta thèse, comme tu l'as été pour la mienne. À Maxime, pour la force de notre amitié, et la confiance mutuelle et aveugle que nous partageons. Avec bien entendu une pensée affectueuse pour Julie, et pour mon cher Lucas, qui deviendra petit et fort, comme son papa ! ;) À tous mes amis clermontois de prépa (et assimilés), je souhaite dire un merci tout particulier, car malgré l'éloignement géographique, malgré les mois passés sans se voir, les retrouvailles sont toujours naturelles et simples : à Nico et Marine, Jo et Mo (et vos deux louloutes, Héléa et Eilis), NicoB, Bubu, Alex, Tibob et Katia, Mourad, Meuh

et Val, Oliv' et Anne, vos amitiés me sont très chères (d'un point de vue relationnel, pas pécuniaire). À Pauline et Ronan, amis par évidence, et pour encore de longues années! Vous avoir près de nous est un bonheur et un soutien quotidien. Enfin, à Renaud, mon plus vieil ami, qui a toujours été à mes côtés, et sans qui je ne serais pas le même aujourd'hui.

Ma famille, si petite soit-elle, m'a toujours accompagné, et pour cela, je souhaite la remercier. À ma belle-sœur, Marie, mes merveilleuses nièces, Léana et Enora (si différentes, et pourtant chacune si riche!), et à leur papa, Greg'. À mes beaux-parents, Michel et Patricia, pour m'avoir vu débarquer dans vos vies il y a plus de 14 ans, et malgré tout me supporter aujourd'hui encore! À mes grands-parents et à ma tante, partis trop tôt, mais en laissant un souvenir impérissable. À mon oncle Daniel, et ses enfants Alexandra, Romain et Andréa. À Marraine et Jean-Marc, et à leur fille Alix, ainsi qu'à son mari Coen et leur adorable petite Camille.

À mon frère, Samuel. Une des rares personnes avec qui tout se passe de mots. Tu sais tout le bien que je pense, à quoi bon m'étaler? :) À Fanny, tu as su mieux que personne donner le sourire à Sam, et avec toi, tout est toujours simple, sincère et joyeux.

À ma mère, Bernadette, pour avoir été irréprochable dans tes enseignements et ton implication dans notre éducation et nos vies. Pour avoir toujours été, avec papa, à mes côtés, m'avoir toujours accompagné dans mes choix, et m'avoir soutenu en toutes circonstances, sans aucune forme de jugement.

À mon père, Jean-Michel, pour m'avoir donné le goût de la curiosité et l'avoir attisée. Avoir un exemple auquel s'accrocher est essentiel pour avancer dans la vie, et le mien est, depuis toujours, une évidence. Puissent mes pas s'éloigner aussi peu que possible des tiens.

Enfin, à Julie, mon amie et amour du premier jour. Pour tout ce que tu es et représentes, pour avoir grandi et évolué avec moi. Tu es l'étoile fixe de mon Univers, celle qui me guide lorsque ma route se perd. À notre fille, Garance : tu as su offrir à ton papa une nouvelle façon de voir la vie. Je réalise aujourd'hui à quelle point, lorsque tu souris et tu ris, toute autre chose devient futile. À ton petit frère ou ta petite sœur, encore bien au chaud dans le ventre de maman à l'heure où j'écris ces quelques lignes, mais qui viendra très prochainement agrandir la Faure-Family.

Table des matières

Introduction générale	1
1 État de l'art	5
1.1 Le cycle perception-action et la prise de décision	5
1.1.1 Cadre théorique de travail	6
1.1.1.1 Approche cognitive	6
1.1.1.2 Approche écologique	10
1.1.1.3 Perception <i>vs.</i> perception-action	13
1.1.2 Variables et outils d'analyse en contexte écologique	16
1.1.2.1 Flux optique	16
1.1.2.2 Affordances	22
1.2 Coordination interpersonnelle et interférence	30
1.2.1 Coordination rythmique	31
1.2.2 Coordination et action conjointe	33
1.2.3 Coordination dans le sport	37
1.2.4 La coordination et l'interférence : l'exemple des sports collectifs	39
1.3 Méthodologies et solutions technologiques pour l'analyse de prise de décision, de coordination et/ou d'interaction	41
1.3.1 Méthodes traditionnelles : l'exemple de la vidéo	42
1.3.2 La Réalité Virtuelle - un outil pertinent pour la re- cherche scientifique	44
2 Synthèse et objectifs	53
3 Plateforme expérimentale - Interagir en réalité virtuelle	57
3.1 Environnement virtuel collaboratif	57
3.2 Architecture générique de communication	60
3.3 Gestion spécifique des applications	62
3.3.1 Étude 1 avec casque de réalité virtuelle	63
3.3.2 Étude 2 en salle immersive	64
3.4 Conclusion	66

Table des matières

4	Coordinations interpersonnelles et interférence lors d'une tâche d'interception - le cas face-à-face	69
4.1	Introduction	70
4.2	Matériel et méthodes	71
4.2.1	Participants	71
4.2.2	Setup expérimental	71
4.2.3	Tâche	72
4.2.4	Procédure	74
4.2.5	Variables dépendantes et analyse	76
4.3	Résultats	78
4.3.1	Interceptions et collisions	78
4.3.2	Zone d'incertitude	80
4.3.3	Moment d'initiation du mouvement d'interception	84
4.3.4	Abandon du mouvement d'interception	85
4.4	Discussion	86
4.4.1	Interceptions et collisions	87
4.4.2	Pattern d'interception et zone d'incertitude	87
4.4.3	Moment d'initiation du mouvement d'interception	89
4.4.4	Abandon du mouvement d'interception	90
4.5	Limites et perspectives	90
4.6	Conclusion	92
5	Coordinations interpersonnelles et interférence lors d'une tâche d'interception - le cas côte-à-côte	93
5.1	Introduction	94
5.2	Matériel et méthodes	95
5.2.1	Participants	95
5.2.2	Setup expérimental	95
5.2.3	Tâche	96
5.2.4	Procédure	97
5.2.5	Variables dépendantes et analyse	99
5.3	Résultats	101
5.3.1	Questionnaires	101
5.3.2	Interceptions et collisions	101
5.3.3	Pattern d'interception collective et zone d'incertitude	102
5.3.4	Cinématique du mouvement d'interception	104
5.4	Discussion	106
5.4.1	Questionnaires	106

Table des matières

5.4.2	Interceptions et collisions	106
5.4.3	Pattern d'interception collective et zone d'incertitude	108
5.4.4	Cinématique du mouvement d'interception	109
5.5	Limites et perspectives	111
5.6	Conclusion	112
6	Discussion générale et Perspectives	113
6.1	Perception-action	114
6.2	Analyse et modélisation des coordinations interpersonnelles et interférences	115
6.3	Coopération en sport et perspectives dans le domaine de l'en- traînement sportif	117
7	Contributions scientifiques	123

Introduction générale

”La seule voie qui offre quelque espoir d’un avenir meilleur pour toute l’humanité est celle de la coopération et du partenariat, où toutes les forces sociales [...] conjuguent leurs efforts en vue d’atteindre des objectifs concrets et réalisables.”

Kofi Annan

Discours à l’Assemblée générale de l’ONU

24 septembre 2001

Depuis son plus tendre âge et jusqu’au crépuscule de sa vie, l’être humain est confronté aux coordinations. Qu’elles soient à l’échelle de l’individu ou du collectif, elles représentent en effet une part primordiale de nos actions quotidiennes. Nous apprenons par exemple à marcher, à croiser d’autres piétons dans un magasin, ou à jouer au ballon avec un ami, autant de situations qui mettent en jeu des interactions et coordinations. Dès lors, lorsqu’elles sont mal réalisées, ces interactions peuvent mener à des issues négatives, comme bousculer quelqu’un dans la rue ou bien provoquer un accident de voiture (voir Figure 1). Cependant, la plupart du temps, on cherche à éviter ce type de situations conflictuelles. Dans ce contexte d’interaction, plusieurs individus peuvent en effet se coordonner pour agir de manière plus efficace, ensemble, afin d’atteindre un but commun : ils coopèrent. Coopérer, c’est formaliser à l’échelle collective un ensemble de compétences, d’intentions et d’actions individuelles. C’est partir d’un ensemble de ”je” pour faire émaner un ”nous”, qui constitue souvent plus qu’une simple somme d’individualités. Si des individus coopèrent, c’est pour réaliser une tâche difficile voire impossible à réaliser seul (*e.g.* porter un baby-foot), ou pour la réaliser plus efficacement (*e.g.* lors d’une contre-attaque en handball ou en rugby). Ces situations, par leur complexité, leur mise en pratique et la finalité qu’elles appellent, exigent des individus une coopération efficace, coordonnée et tournée vers le but partagé.

Dans le domaine sportif, cette coopération est omniprésente. Si nous prenons l’exemple de la réception de service en volley-ball, l’objectif commun au sein de l’équipe (en premier lieu : rattraper le service) demande aux différents joueurs impliqués d’organiser collectivement leurs actions, afin que chacun agisse selon et pour



FIGURE 1 – 29 avril 2018, Grand Prix d’Azerbaïdjan (Bakou). Lors du 40^{ème} tour de piste, alors qu’ils se disputent la 4^{ème} place, Daniel Ricciardo (Red Bull Racing) vient percuter son coéquipier Max Verstappen. Si l’origine de l’accident reste difficile à identifier (les deux pilotes semblent avoir chacun leurs torts), l’issue est en revanche sans appel : abandons simultanés des deux pilotes. Photographie : Fox Sports.

les besoins de la situation. Ces actions, en fonction de l’évolution de la situation, appellent parfois des ajustements dans l’agissement de l’un ou l’autre des participants, afin que le but soit atteint. Sans ces ajustements, ou s’ils sont réalisés de manière trop tardive ou inadaptée, une situation conflictuelle (appelée situation d’interférence) peut apparaître, et avec elle, une réalisation de la tâche inefficace voire délétère. Cette interférence se retrouve fréquemment dans les situations sportives, que ce soit entre adversaires (*e.g.* contact sur un corner en football) ou même entre partenaires (*e.g.* collision lors d’une réception de chandelle en rugby ou d’un service en volley-ball). Pour éviter cette interférence, les individus doivent correctement percevoir la situation, choisir une action, et la réaliser. Dans le cadre sportif, les fortes contraintes temporelles souvent rencontrées peuvent rendre cette coordination difficile, et mener plus fréquemment à des situations conflictuelles. Ainsi, s’intéresser à ces aspects semble important pour la compréhension des interactions et l’apparition de conflits, dans un domaine où la capacité à coordonner les actions à l’échelle de l’équipe est souvent primordiale pour le succès [Silva2013]. Plusieurs méthodes ont cherché à explorer ces interactions, et parmi elles, une technologie grandissante tend à s’imposer comme outil privilégié d’analyse : la réalité virtuelle.

L’objectif de cette thèse est de s’intéresser à ces aspects de la coopération, c’est-

à-dire à la façon dont deux individus vont interagir pour atteindre un but commun, mais aussi comment et pourquoi l'interférence apparaît entre eux, dans une tâche d'interception de balle. Nous baserons notre analyse sur l'utilisation d'outils de réalité virtuelle, qui permettent notamment la standardisation des situations présentées, l'affichage stéréoscopique, ainsi que l'engagement physique et l'adaptation du point de vue du (ou des) participant(s).

Dans un premier temps, l'état de l'art (chapitre 1) s'articulera autour de 3 points principaux. Premièrement, nous aborderons la définition et la compréhension du cycle perception-action et de la prise de décision, qui constituent le cadre théorique d'analyse de cette thèse. Dans un second temps, nous nous intéresserons plus spécifiquement à la coordination interpersonnelle et à l'interférence qui existent dans les situations coopératives, et en particulier dans le domaine sportif. Enfin, nous aborderons les aspects méthodologiques et technologiques, en mettant en particulier l'accent sur la pertinence de la réalité virtuelle pour l'analyse de la prise de décision, la coordination et/ou l'interaction à l'échelle d'un ou plusieurs individus. Après avoir identifié et détaillé les objectifs de notre travail (chapitre 2), la suite de cette thèse présentera la contribution technique (chapitre 3), c'est-à-dire la façon dont ont été créés et utilisés les outils permettant une interaction en temps réel en réalité virtuelle. En particulier, nous détaillerons la manière dont a été construite l'architecture de communication de système, le fonctionnement des surcouches technologiques utilisées (casques de réalité virtuelle HTC Vive, salle immersive type CAVE, voir 1.3.2), et l'ajustement de la communication en fonction du système, des individus et de la tâche. Les chapitres suivants présenteront les études principales de cette thèse, menées grâce aux outils développés. Le chapitre 4 s'attachera aux interactions et interférences qui existent entre deux individus placés face-à-face et interceptant collectivement une balle. En particulier, nous explorerons le poids de la complexité de la tâche (informations visuelles disponibles, incertitudes sur les mouvements du partenaire) dans l'apparition et l'évolution d'une interférence entre les participants. Le chapitre 5 s'intéressera quant à lui à une tâche d'interception collective réalisée côte-à-côte. Plus précisément, nous chercherons à savoir si le mode d'interception (mains, tête) influence la performance d'interception et l'interférence entre les participants. Enfin, l'ensemble de ces résultats et observations sera ensuite discuté dans un dernier chapitre (chapitre 6), afin de mettre en lumière la façon dont les coordinations et interférences peuvent être modélisées et analysées dans une tâche d'interception de balle à deux. Nous chercherons aussi à mettre en avant l'intérêt de cette méthodologie et analyse pour l'étude de situations plus générales de coopération/coordination, comme souvent rencontrées en sports collectifs.

1 État de l'art

1.1 Le cycle perception-action et la prise de décision

"Percevoir", c'est utiliser un ou plusieurs de nos cinq sens pour nous relier au monde dans lequel nous évoluons. En particulier, c'est la vision qui constitue "le canal privilégié par lequel nous explorons, évoluons et interagissons avec notre environnement" [Prevost2002]. "Agir", c'est utiliser l'information disponible dans la situation pour prendre une décision et produire une action, mais aussi être capable de modifier et adapter son comportement en fonction de l'évolution de la situation. Dès lors, la prise de décision repose non seulement sur notre capacité à extraire les informations pertinentes de la situation, mais aussi à choisir parmi l'ensemble des solutions qui se présentent celle jugée la plus appropriée pour répondre au problème que pose la situation. Dans le domaine sportif, par exemple, la perception est un élément important de la performance sportive [Abernethy1990a, Abernethy1990b, Abernethy1993a, Shim2005, Starkes1993, Starkes2000, Williams1999], et l'individu performant devra extraire rapidement et judicieusement l'information pertinente pour agir en conséquence.

La compréhension de la prise de décision repose sur la description et l'analyse de la façon dont le ou les individus va/vont décider qui réalisera l'action, comment et à quel moment, en fonction des informations disponibles dans l'environnement. En d'autres termes, l'idée est de comprendre comme s'organise l'action à l'échelle de l'individu, mais aussi à l'échelle plus large de l'ensemble des individus, en réponse à une situation contrainte temporellement et spatialement. Dans le contexte d'une équipe sportive, par exemple, cela sous-tend l'idée de complémentarité, de coordination et de coopération entre l'ensemble des membres de l'équipe, afin de réaliser collectivement la tâche (interception de balle ou de joueur, réception de balle, etc.), le plus efficacement possible, et sans interférer avec les partenaires. Cette coopération s'appuie sur le fait que, si les deux partenaires initient une action d'interception, l'un des deux doit abandonner son mouvement pour ne pas interférer avec l'autre. Cette observation sous-tend l'idée d'une adaptation à la situation, en direct, en fonction de son évolution. De nombreuses études se sont attachées à étudier comment est prise une décision, en particulier à l'échelle d'un individu. En effet, la plupart des travaux menés a cherché à comprendre et analyser comment un individu choisit une

option parmi l'ensemble des options possibles, en s'appuyant sur deux modèles principaux de représentation : l'approche cognitive (ou approche indirecte) et l'approche écologique (ou approche directe).

1.1.1 Cadre théorique de travail

1.1.1.1 Approche cognitive

L'approche cognitive considère traditionnellement le comportement humain comme la réponse à un système de calculs [Von Eckardt1993] (= un système "computationnel"), dans un processus parfois assimilé à celui d'une intelligence artificielle [Haugeland1989]. Le système (= le cerveau) est au centre de la théorie, reçoit l'information sensorielle, la traite puis sélectionne une action jugée appropriée [Berthoz1997, Neisser2014]. A ce titre, Schmidt souligne que *c'est l'agent qui détermine les muscles à se contracter, ainsi que l'ordre et la durée de leur contraction* [Schmidt1993], avec une commande centrale de la perception et du mouvement. Il s'enrichit de plus des informations qu'il reçoit pour construire des bases de connaissances et optimiser leur structuration [Cisek2007]. Lorsqu'un stimulus est envoyé ou perçu, le système va donc se référer à la base de connaissances établie pour catégoriser le stimulus, et lui apporter une réponse. Ainsi, le stimulus apporte un enrichissement du système et de sa réponse permettant de récupérer des informations plus importantes et riches, ainsi que de choisir la réponse la plus adaptée et efficiente possible [Wood2003]. Le choix de cette réponse est conditionné par l'information venant de la situation ainsi que par les réponses possibles, et se manifeste comme une concurrence continue entre ces différentes options de réponse, jusqu'à ce que suffisamment d'informations permettent d'écarter l'une ou l'autre des possibilités [Cisek2007, Lepora2015] et qu'une option soit sélectionnée pour répondre à la tâche.

Par ses fondements, la perspective cognitive suppose une dissociation entre perception et action : dans sa base, le sujet possède une partie voire la totalité de la solution au problème posé par la tâche, puis le cerveau se charge de sélectionner et exécuter cette commande [Laurent1996]. La perception et l'action sont envisagées comme des processus pouvant être étudiés indépendamment l'un de l'autre, et des processus cérébraux internes seraient à l'origine du lien qui s'opère entre les deux [Handford1997]. Ainsi, la représentation repose sur la captation et l'analyse par le cerveau des informations sensorielles de l'environnement (= les entrées) pour sélectionner et produire une action en conséquence (= la sortie). Jean-Pierre Famoso apporte alors la représentation schématique selon laquelle le traitement de l'information se déroule en trois temps : le stade perceptif, le stade de décision, et le stade

de l'exécution [Famose1984].

Durant le stade perceptif, les cinq sens de l'individu vont lui permettre de capter les informations venant de l'environnement, et plus précisément, de son espace d'action. Ces informations sont comparées aux représentations déjà recueillies et conservées par le système (le cerveau) dans des situations similaires. Cependant, du fait de capacités cognitives limitées de l'être humain [Hyman1953] ainsi que des contraintes temporelles inhérentes à la tâche, ce prélèvement d'informations doit être rapide et adéquat. L'expérience est alors primordiale sous ce concept, car elle enrichie la base de connaissances de situations et stimulations environnementales lors de la confrontation à une nouvelle situation. Un exemple simple serait celui d'une réception de chandelle en rugby : un jeune joueur ayant été peu confronté à des réceptions de chandelles aura du mal à percevoir la trajectoire de balle et à anticiper son positionnement, et ne devra pas quitter la balle des yeux pour acquérir un maximum d'informations. A l'inverse, un joueur professionnel évaluera rapidement sa trajectoire, se positionnera en conséquence, et pourra quitter la balle des yeux pour observer le placement des partenaires et adversaires sur le terrain.

Lors du stade de décision, le plan d'action et ses différentes phases sont sélectionnés, au regard des informations précédemment acquises sur la situation et la tâche. Parmi les comportements possibles pour répondre à cette tâche, le plus adapté et fonctionnellement efficace est choisi, au regard du but à atteindre mais aussi du plan d'action qui permet de l'atteindre. Ainsi, dans une situation contrainte temporellement comme une situation sportive, la rapidité de prise d'information (lors du stade perceptif) de même que la quantité d'informations conditionneront la prise de décision [Hyman1953], et avec elle, la rapidité et l'efficacité de l'action choisie. Pour reprendre l'exemple du rugby, un demi d'ouverture qui recevra la balle devra par exemple choisir à partir des informations prélevées durant le stade perceptif l'action la plus adaptée, dirigée vers un but au moment de son choix (marquer un essai, éloigner le danger de son propre camp, etc.). Il pourra dès lors choisir de garder la balle, attaquer la ligne de défense adverse, ou encore jouer un coup de pied dans un espace inoccupé du terrain.

Enfin, le stade de l'exécution aura pour objectif de mettre en œuvre les activations musculaires nécessaires à la réalisation du plan d'action sélectionné, afin d'atteindre le but. Dans l'exemple du rugby, un joueur qui exerce un placage sur un joueur, après avoir pris les informations nécessaires au choix d'un plan d'action et identifié l'action à réaliser la plus efficace et adaptée, devra mettre en œuvre l'exécution de son plan : positionner ses jambes et ses bras pour préparer le plaquage, placer sa tête, serrer les jambes de l'adversaire, etc.

Dans ce contexte-ci, l'approche cognitive suggère que l'ensemble de ces opérations requiert du temps pour être exécutées, et la complexité de la tâche ainsi que l'expérience antérieure influence le temps disponible pour percevoir, décider et agir. De plus, l'ordre de ces stades de traitement de l'information est invariant, suivant la logique suivante : perception, décision, action. La figure 2 propose une représentation schématique de l'approche cognitive. Si une perturbation de la situation se produit, ou si de nouvelles informations sont disponibles, un nouveau cycle est lancé et peut mener à un choix de plan d'action différent, un ajustement du plan initial préalablement établi. Un demi d'ouverture qui avait choisi de taper la balle au pied dans un espace inoccupé peut dès lors revenir sur son choix, après qu'un adversaire se soit rapidement replacé dans cet espace, en engageant un nouveau cycle de traitement de l'information, de sélection et d'exécution de la commande motrice.

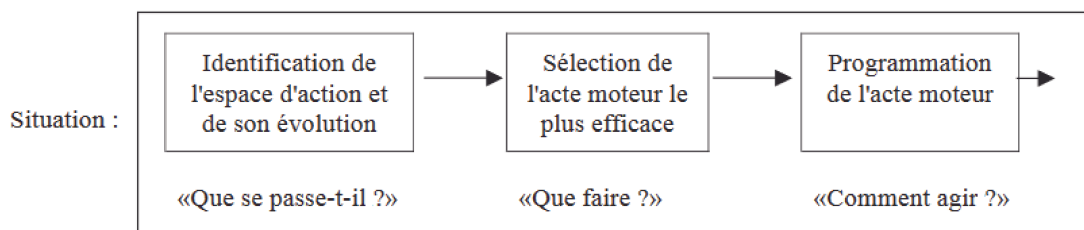


FIGURE 2 – Modèle de représentation du traitement de l'information dans l'approche cognitive. D'après [Famose1984]

Cependant, cette approche cognitive n'a ici été abordée que du point de vue d'un individu, et sa remise en cause est questionnée lorsque l'on considère la prise de décision à l'échelle de deux (ou plusieurs) individus, et donc, de plusieurs systèmes (= cerveaux) de traitement de l'information. En effet, la présence conjointe de plusieurs personnes représente un challenge important pour les théories cognitives [Benerink2017]. Lors d'une action conjointe, la réussite dans la tâche est souvent conditionnée par la façon dont les personnes s'organisent collectivement pour répondre à cette tâche, et les choix d'organisation faits, parmi les options possibles. Du point de vue de la prise de décision, cette action conjointe appelle nécessairement alors un choix collectif pour déterminer qui va faire quoi, quand, et comment [Benerink2017]. Par exemple, lors d'un déménagement dans un appartement au troisième étage, le transport de la machine à laver va nécessiter une interaction, une coordination entre deux personnes ou plus. Ainsi, un choix collectif va devoir être fait, pour déterminer qui va porter quelle partie de la machine, et comment. Plusieurs options sont en effet possibles, l'un devant et l'autre derrière, ou chacun d'un côté par exemple. Ce choix sera alors opéré en fonction de la largeur et la hauteur de la

porte, de l'escalier, du gabarit des deux personnes, etc. De la même façon, dans une contre-attaque en handball, le choix peut être fait d'attaquer par la gauche ou par la droite, et sera conditionné par le placement des défenseurs, le lieu de récupération de la balle, etc. La question qui se pose dans ces deux exemples est la même, c'est-à-dire de savoir comment deux personnes ou plus vont s'organiser collectivement pour atteindre un but commun. Plus précisément, la question est de savoir comment chacun des individus va réaliser un choix propre d'action qui sera complémentaire du choix d'action de l'autre (ou au moins, n'interférera pas avec lui). Ainsi, l'action conjointe dans cette optique devient une action coordonnée et interactive, qui répond à un processus continu de prise d'informations, de sélection et d'exécution d'actions motrices, pour répondre aux éventuelles adaptations de l'autre.

Dans ce contexte apparaît la notion de connaissances partagées, qui correspond aux connaissances communes aux différents membres d'une équipe (au sens large du terme) nécessaires à l'exécution d'une action conjointe dirigée vers un but commun [Vesper2017]. Ainsi, elle constitue la partie partagée des "bases de connaissances" des individus issues de leur expériences antérieures. Au niveau de l'équipe, cela se traduit donc par un moyen de compréhension mutuelle des actions et connaissances des individus, et l'anticipation par chacun des membres de l'action des autres pour atteindre un but commun. S'il a été montré que la communication verbale était un outil important pour formaliser les connaissances partagées et permettre une division des tâches efficace [Clark1996, Brennan2010], il n'est cependant pas rare, en particulier dans le domaine du sport, de voir des situations de coopération où la communication verbale est impossible. Par exemple, en volley-ball, un service met environ 0,7 à 1,1 secondes pour arriver sur l'adversaire [Agelonidis2004, Benerink2015]. Compte tenu de cette forte contrainte temporelle, les joueurs qui réalisent la réception du service doivent souvent se passer de communication verbale pour décider qui doit réaliser la réception. En effet, dans ce type de situation, la communication verbale est trop lente pour permettre une réaction efficace [Tenenbaum2003], et les joueurs doivent alors trouver un autre mode de prise d'informations pour coordonner leurs actions. De plus, il apparaît important que les joueurs impliqués dans la tâche aient accès aux mêmes informations sur l'environnement et son évolution, pour avoir une meilleure compréhension commune de la tâche, et ainsi mieux se coordonner en anticipant l'action de leur(s) partenaire(s) [Blickensderfer2010].

Cependant, cette approche cognitive possède des limites majeures pour l'étude de situation variables et temporellement contraintes. En effet, il a souvent été mis en avant que la charge de calcul nécessaire à l'analyse des informations, le choix des décisions et la mise en œuvre des actions seraient trop importants pour l'être humain

si celui-ci devait, à tout instant, analyser l'ensemble des possibilités d'action dans un environnement dynamique incertain et soumis à une importante pression temporelle [Temprado2001]. De plus, bien qu'elle contribue grandement à la compréhension des mécanismes de traitement de l'information et de prise de décision, l'approche cognitive a encore des difficultés à expliquer les mécanismes sous-jacents impliqués dans la coordination de deux (ou plusieurs) participants, et plus particulièrement, à prendre en compte le caractère adaptatif de la perception et de l'action, dans des situations (sportives ou même quotidiennes) souvent sujettes à de nombreuses variations dynamiques [Richardson2010]. Pour répondre à ces problèmes, une autre approche propose une relation plus directe entre la perception et l'action, qui sont vues comme couplées à l'environnement. Cette approche, dite écologique, propose que ce qui est perçu est significatif, que l'action est significative, sans que le cerveau n'ait besoin d'interpréter ce qui est perçu. L'action émerge de la relation directe entre l'individu et l'environnement dans lequel il évolue, plutôt que d'un processus déterminé et fixe de traitement de l'information par le cerveau.

1.1.1.2 Approche écologique

Dans notre vie quotidienne comme dans le contexte sportif, nos actions sont dépendantes de l'environnement et des autres individus (croiser d'autres voitures à un carrefour, dribbler un adversaire en football, faire une passe à un coéquipier en rugby, etc.). Dans le contexte de l'approche écologique, cela suggère que l'environnement doit apporter l'ensemble des informations nécessaires à la prise de décision. Fondée notamment sur les travaux de Bernstein sur la réduction des degrés de liberté [Bernstein1967] et surtout ceux de Gibson sur la perception directe [Gibson1950, Gibson1961, Gibson1966, Gibson1979], l'approche écologique propose l'existence d'une régulation continue, une relation circulaire entre la perception et l'action. En particulier, dans son dernier livre, Gibson a développé l'idée que la perception et l'action seraient liées selon trois grands principes [Gibson1979, Chemero2011] :

1. **La perception est directe**, c'est-à-dire qu'elle n'implique aucune forme de calcul ou de représentation mentale. D'après Gibson, l'idée ne réside pas dans la conjonction d'informations stockées dans le cerveau à des sensations perçues, et ce qui est perçu est directement significatif pour l'individu qui perçoit.
2. **La perception est orientée pour guider l'action**, et ne sert pas à recueillir des informations diverses et neutres. Nous percevons des choses dans l'environnement afin de réaliser des actions, mettant en avant l'importance du

couplage perception-action dans cette approche.

3. **La perception repose sur les affordances**, c'est-à-dire que l'environnement doit fournir toutes les informations nécessaires pour guider le comportement adaptatif, et *in fine*, l'action. Cette notion d'affordances [Gibson1979], qui correspond aux possibilités d'action suggérées par l'environnement, sera discuté plus en détails par la suite (section 1.1.2.2).

La relation perception-action serait donc directe, et conditionnée par l'environnement et les possibilités d'action qu'il suggère : une tasse suggère par exemple l'action de boire, un ballon l'action de frapper dedans et une échelle l'action d'y grimper. Les formes d'action vont dépendre des caractéristiques perceptives des stimuli, et en ce sens, on dit que l'information spécifie l'action. Cependant, l'action spécifie aussi la perception car ce que l'on perçoit dépend des actions que l'on exécute. Les informations ne sont captées que par rapport à une action à réaliser, et la perception est structurée par les actions. Dans ce contexte, Gibson exprime parfaitement la relation directe qui existe entre perception et action, et comment sa position se place en rupture conceptuelle avec les théories précédentes :

"Moving from place to place is supposed to be "physical" whereas perceiving is supposed to be "mental", but this dichotomy is misleading. Locomotion is guided by visual perception. Not only does it depend on perception but perception depends on locomotion inasmuch as a moving point of observation is necessary for any adequate acquaintance with the environment. So we must perceive in order to move, but we must also move in order to perceive." ([Gibson1979], p. 223)

Ainsi, la perception à travers le flux optique (il constitue les transformations de l'image rétinienne liées au mouvement et à la position, cf. Figure 4) permet de prélever les informations sur les composantes variables et fixes de l'environnement : les éléments, leurs surfaces, leur disposition et les événements qui surviennent sur ces éléments. Ces informations issues du flux optique peuvent directement influencer le contrôle du mouvement dans le comportement adaptatif (*i.e.* la réponse motrice dynamique adaptée à la situation), le mouvement contrôlé du comportement adaptatif altérant à son tour les informations provenant du flux optique [Kugler2015, Lynch2018]. La figure 3 présente le cycle perception-action au regard de la dynamique comportementale [Fajen2003], c'est-à-dire de la dynamique de coordination temporelle et spatiale entre un individu et son environnement. La dynamique comportementale émerge des relations avec l'environnement, le corps ou

encore les variables informationnelles. Ainsi, elle n'est pas une propriété de l'individu seul, mais du système pris dans son ensemble. En retour, le cycle perception-action est "capté" pour adapter le mouvement en réponse au stimulus, et à l'action déjà réalisée, pour générer un mouvement le plus efficace possible. L'information, dans ce contexte, prend un rôle primordial dans la relation perception-action, car la détection et l'utilisation d'informations spécifiques permet la perception des propriétés de l'environnement et les possibilités d'action, et de cette manière, établit un lien fort et réciproque entre l'agent et son environnement. Par exemple, lors d'un pas durant la course à pied, une force est appliquée contre le sol (la surface sur laquelle on marche), et la force de réaction permet la propulsion du corps vers l'avant, et avec lui, le déplacement du point d'observation. Ceci modifie les directions/positions égo-centriques des objectifs et des obstacles, et génère un modèle de flux optique au point d'observation, qui lui-même va conditionner le pas suivant dans le cycle de course. Perception et action s'influencent donc mutuellement au cours du mouvement.

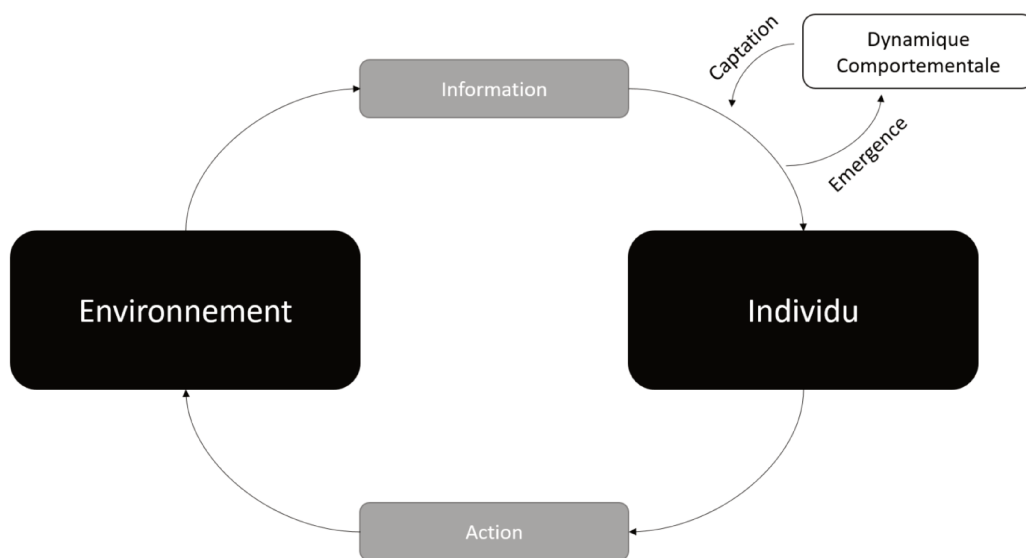


FIGURE 3 – Le cycle perception-action au regard de la dynamique comportementale. Adapté d'après [Warren2006].

1.1.1.3 Perception vs. perception-action

"We must perceive in order to move, but we must also move in order to perceive" ([Gibson1979], p.223)

Comme nous l'avons vu précédemment, dans une approche écologique, l'interaction entre perception et action n'est pas à sens unique, mais constitue un couplage direct et réciproque, où la perception est pour l'action, qui elle-même modifie la façon dont nous percevons. En ce sens, la vision de Gibson (cf. partie 1.1.1.2) suggère l'importance non seulement de percevoir, mais aussi d'agir, pour une compréhension complète du phénomène.

Sébastien Brault (2011) souligne que les tâches de "jugement" sollicitent uniquement la stratégie perceptive de l'observateur [Brault2011], et que dans les travaux qu'il a mené sur la feinte de corps en rugby, la performance de l'individu (expert ou novice) est d'autant meilleure que la tâche implique un mouvement de l'individu. En premier lieu, il suggère que la performance (qui peut être de n'importe quelle nature : pourcentage de réussite, temps de réaction, etc.) de l'expert sera meilleure que celle du novice, quelle que soit la situation de référence ("jugement" uniquement, implication motrice, etc.). De plus, cette relation (ici envisagée comme continue) n'est pas linéaire, et la mise en action permettrait une bien meilleure (optimisation de la) performance qu'une tâche plus décontextualisée de "jugement". Ainsi, et au regard des éléments également apportés par Gibson, il semble que l'individu sera d'autant meilleur que la tâche mettra en jeu l'action, l'implication physique, dans une situation proche d'une situation réelle.

Cette observation avait déjà été faite par Oudejans et al. (1996) qui ont comparé le comportement de véritables piétons (*i.e.* observés en situation réelle, naturelle) lors de la traversée d'une rue, lorsqu'ils se tenaient immobiles sur le trottoir ou lorsqu'ils marchaient [Oudejans1996]. Les auteurs ont trouvé que la perception des piétons de la possibilité de traverser entre deux voitures était meilleure lorsqu'ils marchaient, c'est-à-dire que les piétons qui marchaient ont laissé passer moins d'occasions de traverser. Cette observation s'expliquait avant tout par la prise "dynamique" d'informations lorsque les participants marchaient, qui leur a permis de percevoir plus efficacement les mouvements des voitures, et d'anticiper les situations où il était possible de traverser. En d'autres termes, la pertinence/précision de la perception de l'affordance a augmenté lorsqu'une action était produite (ici, l'action de marcher), mettant en avant l'importance de ce couplage entre perception et action. À ce titre, Vand der Kamp et al. (2008) ont souligné le fait que l'absence d'une production d'action dans

une situation de "jugement seul" pouvait être à l'origine d'une minimisation/sous-estimation des résultats observés [Van der Kamp2008], en particulier chez les sujets experts, comme déjà observé auparavant [Williams1994b]. De plus, s'appuyant sur l'exemple de l'interception de balles, ils ont souligné que, hormis quelques exceptions, la plupart des études originelles ont mises en place des situations où les participants n'interceptaient pas réellement les balles. Ces situations reposent cependant autant sur la perception que sur l'action, et il semble intéressant et pertinent d'examiner ces deux systèmes lorsqu'ils travaillent ensemble [Van der Kamp2008]. Les auteurs précisent que ces observations ont alors mené plusieurs chercheurs à intégrer l'exécution d'une action en réponse au comportement d'un adversaire présentée sur un écran (*e.g.* [Rowe2001, Savelsbergh2002, Savelsbergh2005, Williams1994a, Williams2004]). Cependant, Abernethy et Mann (2008) ont souligné le fait que ces différences observées dans plusieurs études pourraient aussi être liées à des limitations méthodologiques, et en particulier l'utilisation de caméras vidéos qui ne permettent pas une perception active [Abernethy2008]. Dans le souci d'étudier ce double intérêt de la production d'un mouvement et d'une perception active, Craig et al. (2011) ont proposé à des participants de juger la direction finale de coups-francs incurvés, dans une tâche non pas de perception seule comme déjà réalisée auparavant [Craig2006, Craig2009], mais dans une tâche où les participants pouvaient intercepter la balle [Craig2011]. Ils ont trouvé, dans ce type de tâche, que l'interception guidait l'action, et que les participants contrôlaient l'issue de la situation de manière prospective (*i.e.* mettaient en place une régulation dynamique de leur mouvement en réponse à leur perception de la situation, à tout instant). C'est aussi dans cette dynamique que Brault et al. (2012) ont proposé une double étude pour analyser la capacité d'individus (experts ou novices) à percevoir une feinte de corps en 1 contre 1 en rugby, dans une tâche de perception seule (perception ou non d'une feinte), ou de perception et action couplées (perception ou non de la feinte et action de plaquage, d'interception du joueur) [Brault2012]. Ainsi, les auteurs ont pu mettre en avant le fait que, outre la compréhension de la façon dont l'information perceptive influence les décisions quant au moment et à la manière d'agir, la situation de perception-action permet de comprendre comment le défenseur peut utiliser cette information dynamique issue de l'attaquant pour contrôler sa propre action et intercepter le joueur. Cette approche permet dès lors, par la complémentarité des axes qu'elle met en jeu, de comprendre (par exemple ici) pourquoi l'expert est meilleur que le novice, et pas simplement de le constater. Brault (2011) souligne alors l'observation suivante :

"La performance mesurée en "jugement" ne serait donc pas potentiellement le reflet de la performance unique et globale. En tout cas elle ne l'explique pas pleinement. Il devient donc nécessaire d'étudier la perception "en action" et sous la contrainte. C'est effectivement le seul moyen de mettre pleinement en jeu la stratégie perceptivo-motrice et par conséquent de comparer de manière pertinente l'expert et le novice." ([Brault2011], p.106)

Cette idée de "contrainte" dont parle Brault a été évoquée par Van Der Kamp (2008), qui met en avant le fait que contraindre la réponse des participants en leur demandant de répondre le plus rapidement possible ne permet pas, malgré tout, de reproduire la contrainte réellement vécue par un individu dans une situation réelle, avec l'exécution d'une action *online* [Van der Kamp2008]. En effet, une situation de "jugement" seule réalisée sous contrainte temporelle permettra d'évaluer ou entraîner une perception des affordances, mais ne résultera pas forcément en une production d'action plus efficace [Van der Kamp2008]. En d'autres termes, la perception et l'action, pour être entraînées efficacement, doivent être prises en compte simultanément, et pas de manière isolée. C'est dans cette même idée que Araújo et al. (2019) soulignent que l'action émerge sous les différentes contraintes en interaction [Araújo2019], et dès lors, émane de la situation prise dans sa complexité.

De manière plus large, cette approche ne s'applique pas seulement à la comparaison expert-novice, mais à toute situation qui met en jeu un engagement physique dans la tâche. À ce titre, Craig (2013) a souligné que, dans le domaine du sport, le poids de la boucle perception-action était primordial [Craig2013]. En effet, la préservation de cette boucle présente dans une situation réelle permet à la tâche de laboratoire de s'approcher au mieux du réalisme, de la fidélité, et avec eux, de l'exactitude des résultats observés, rejoignant la recommandation de Gibson selon laquelle *"It is not true that "the laboratory can never be like life". The laboratory must be like life!"* ([Gibson1979], p. 3). Ainsi, les comportements observés dans le laboratoire seront d'autant plus proches des comportements observés dans une situation réelle que le cycle perception-action aura été conservé. En ce sens, Craig (2013) observe que, si beaucoup de travaux ont abordé et étudié la prise de décision en sport à partir de stimuli réels (*e.g.* vidéos ou photos de situations réelles), ces approches présentent des problèmes majeurs : situations présentées depuis un point fixe (*i.e.* qui ne reproduit pas le point de vue égocentrique et dynamique d'un joueur), absence de parallaxe (et avec lui, de variations dynamiques dans le flux optique), etc. En conséquence, ces approches ne permettent pas de capturer la complexité de la relation individu-environnement, et l'évolution de l'information disponible et perçue en rapport aux

mouvements propres de l'individu. Pour supporter ce constat, il a été montré que lorsque les contraintes de la tâche sont trop éloignées du contexte sportif réel, les sources d'information pertinente pour la performance sont absentes, et résultent en une performance minimisée ou incomplète ([Abernethy1993b, Dicks2010a]).

Ainsi, conserver la boucle perception-action est un élément important dans l'analyse de situations mettant en jeu un engagement physique, comme la plupart des situations sportives par exemple. Dès lors, dans l'analyse de ces situations, il semble intéressant de s'attacher au couplage perception-action, et pas seulement à la perception de l'individu. Ceci semble d'autant plus vrai dans les situations de collaboration, où la coordination interpersonnelle est fortement reliée à la construction et au maintien d'un espace social et affectif commun qui implique le corps entier des personnes qui interagissent [Cornejo2017].

Forts de ce constat, il nous apparaît important pour notre approche d'interception collective de balle de nous affranchir des problèmes parfois observés dans les situations de "jugement" seul (*e.g.* manque de réalisme de la situation proposée, défaut d'immersion ou d'implication dans la tâche, absence de parallaxe). En effet, ces problèmes empêchent d'appréhender pleinement les relations individu-environnement et individu-individu, et d'offrir un terrain d'étude de laboratoire comparable à une tâche réelle (ou à défaut, s'en éloignant un minimum), tout en proposant des conditions standardisées, mesurables et répétables. Ainsi, se pose la question des méthodologies et supports technologiques d'étude permettant de limiter au maximum ces risques. Le cadre d'analyse écologique, par les liens qu'il établit entre perception et action (et le caractère adaptatif et continu de la relation), semble dès lors particulièrement intéressant pour l'étude de tâches de collaboration en réalité virtuelle, lors d'une interception de balle. La question de l'étude objective de cette relation se pose alors.

1.1.2 Variables et outils d'analyse en contexte écologique

1.1.2.1 Flux optique

L'agent appréhende donc son environnement via les informations sensorielles, et parmi elles, s'attache particulièrement à la vision [Williams1999]. Selon la théorie de Gibson, le monde est constitué de rayons lumineux ambiants rectilignes qui se réfléchissent sur les surfaces et objets de l'environnement et parviennent à l'œil de l'observateur, formant alors un champ optique. Chaque fois que nous nous déplaçons (mouvements des yeux, de la tête ou du corps entier), nous produisons des stimulations visuelles qui consistent en la modification du champ optique projeté sur toute la rétine [Mestre1992]. La façon non-uniforme dont ces rayons parviennent

à l'œil humain apportent de nombreuses informations sur la nature de la surface, sa forme, sa texture, etc. Lorsque l'individu se déplace, les modifications du champ optique ambiant (que Gibson appelle le flux optique) qu'il reçoit évolue avec son déplacement, lui permettant d'appréhender le monde et l'environnement de manière dynamique. On distingue alors deux types de flux optique : le flux local, et le flux global. Le flux local se rapporte à des modifications du champ optique dues à des changements dynamiques dans l'environnement (*e.g.* un joueur qui court, un ballon qui se déplace). Le flux global renvoie aux modifications du champ optique dues au mouvement de l'agent dans l'environnement, et donc, de son point d'observation (*e.g.* un but de football perçu comme plus grand par un joueur qui s'en est rapproché) ([Gibson1979], cité par [Ledouit2015]). De plus, non seulement le flux est ordonné en rayons lumineux (les "invariants", *i.e.* les éléments inchangés, fixes de l'environnement), mais il existe également des perturbations du flux (les "variants", *i.e.* les éléments variables, évolutifs de l'environnement). Ces perturbations nous aident alors à percevoir le mouvement des objets se déplaçant dans l'environnement, la disposition des surfaces et objets, ainsi que notre propre déplacement [Williams1999]. La figure 4 illustre cette notion, à travers deux positions de l'observateur : lorsqu'il est assis, il reçoit de l'environnement un ensemble de flux optiques qui lui offre une vision de l'environnement dans lequel il se trouve. Lorsqu'il se lève, l'environnement n'a pas été modifié, mais sa perception des invariants, quant à elle, est sujette à changements de par son nouveau positionnement relativement à l'environnement observé. Le flux optique n'est alors pas fixe, mais variable, et dépend du mouvement de l'observateur et de sa direction. Gibson donne dans son livre des exemples très parlant : la figure 5.A illustre le flux optique perçu par le pilote d'un avion regardant au loin, dans la direction du mouvement. La figure 5.B présente le flux optique perçu par ce même pilote qui regarde par la fenêtre de droite, perpendiculairement à la direction du mouvement. Enfin, la figure 5.C présente le flux optique perçu par ce pilote lors d'une situation d'atterrissage, où son attention visuelle est portée sur un point précis de la piste. Dans ces trois situations, le flux visuel est modifié en fonction de la situation, ce qui se traduit par différentes évolutions du flux optique (*i.e.* sur les figures, différentes évolutions des vecteurs représentant les variations du flux). A travers cet exemple, on établit que les invariants et les variants sont source d'informations pour l'observateur, sur l'évolution de la situation. En effet, Gibson soulève à ce titre plusieurs éléments importants ([Gibson1979], p. 227-229) :

- o Le flux optique signifie un mouvement dans l'environnement, et l'absence de flux signifie l'immobilité dans l'environnement.
- o Un flux divergeant signifie une approche de l'objet, et un flux convergent si-

gnifie un éloignement de l'objet.

- o Le centre/foyer du flux divergent spécifie la direction du mouvement dans l'environnement.
- o Un décalage dans le centre/foyer du flux indique un changement dans la direction du mouvement, tandis qu'une absence de décalage dans le centre/foyer du flux indique un maintien de la direction du mouvement, dans l'environnement.

Ces postulats rejoignent et étayent l'observation de Turvey qui a montré que les invariants permettaient de savoir si un élément s'approchait d'un individu (expansion optique uniquement de cet élément) ou si l'individu s'approchait de l'élément (expansion optique de tous les éléments de l'environnement) [Turvey1977]. C'est dans ce contexte que la perception et l'action sont liées, car le mouvement modifie le flux optique, et avec lui la perception de l'environnement et de la situation. Apparaissent alors de nouvelles possibilités d'action, guidées par la perception.

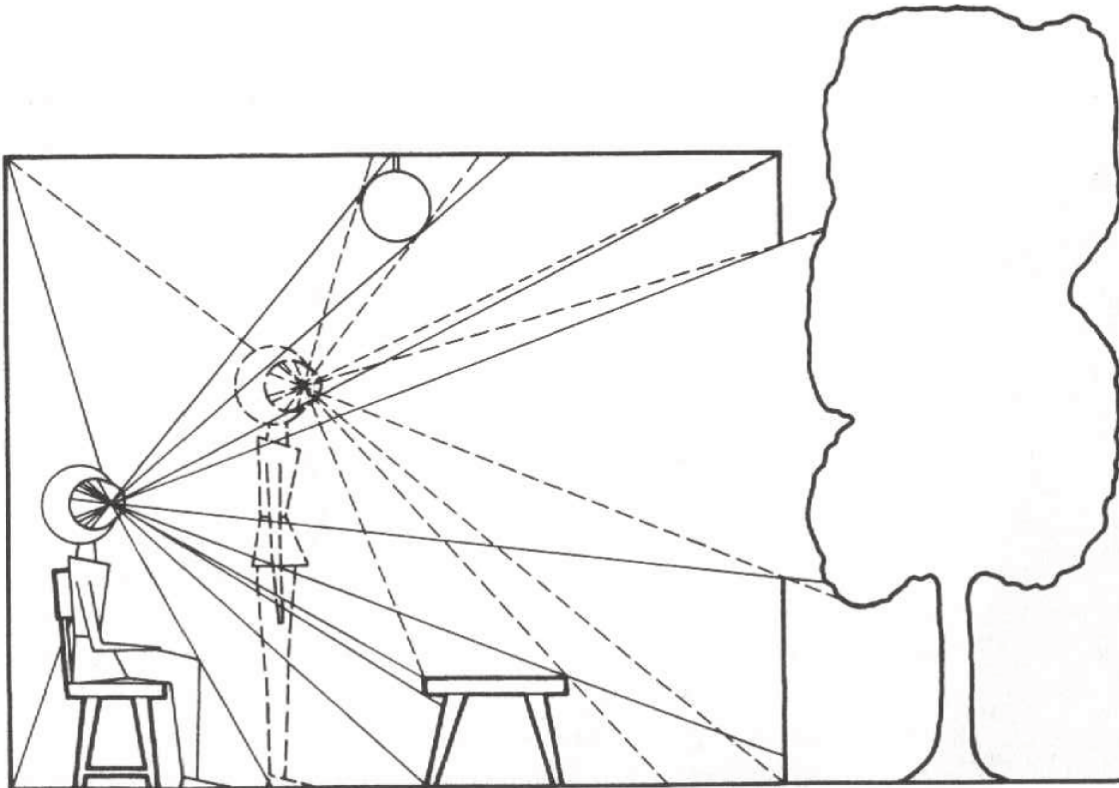


FIGURE 4 – Évolution du champ optique en fonction de la position de l'observateur. Le passage de la position assise à debout (et vice versa) induit des changements dans le flux optique perçu, et la perception de l'observateur est modifiée. D'après [Gibson1979].

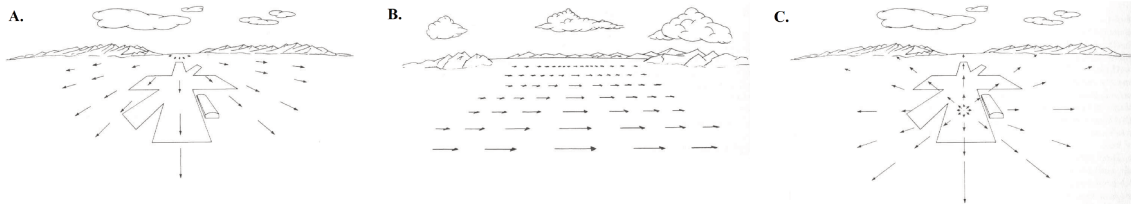


FIGURE 5 – Flux optique perçu par le pilote d'un avion : A. regardant au loin, dans la direction du mouvement, B. regardant à droite, perpendiculairement à la direction du mouvement, et C. lors d'une situation d'atterrissage. D'après [Gibson1979].

Théorie du Tau

Ainsi, le flux optique se rapporte aux changements au cours du temps du champ optique, qui permettent de donner à l'observateur des informations sur l'évolution de l'environnement dans lequel il se situe. Cet aspect temporel du flux optique a été exploré par David Lee [Lee1976] afin d'expliquer mathématiquement comment sont gérés certains événements d'une situation les uns par rapport aux autres. Cette gestion temporelle tend à permettre de synchroniser nos actions par rapport à un événement précis, qui peut par exemple être le moment de la frappe dans une balle, ou l'évitement d'un défenseur en rugby. Dès lors, selon Lee, les informations visuelles permettent de renseigner l'observateur sur le temps restant avant cet événement et de guider ses actions. Ce *temps avant contact* correspond à la durée séparant l'objet de l'œil à un instant t , durée associée à la modification de la taille de la projection de l'objet sur la rétine ([Lee1976, Lee1985]), comme illustré sur la figure 6. À ce titre, il introduit la variable Tau (τ) qui traduit la manière dont un intervalle est modifié entre deux instants [Lee1976, Lee1998]. Cette notion de Tau se rapporte au changement de l'angle visuel d'un objet, lui-même relié au temps avant contact. D'après la figure 6, mathématiquement, la surface (L) approche de l'œil à une vitesse constante $V(t)$. À un instant donné t , cette surface est à une distance $D(t)$, et la projection de L sur la rétine est $l(t)$. Tandis que la distance entre l'objet et l'observateur diminue, $l(t)$ augmente à la vitesse $v(t)$. Dès lors, la notion de Tau est liée à ce temps avant contact suivant la formule :

$$\tau = \frac{l(t)}{v(t)} \quad (1)$$

Ainsi, Tau est le ratio entre la taille de la projection rétinienne et la vitesse d'expansion de l'image rétinienne, à un instant donné. Tau apporte dès lors des informations sur l'évolution d'un objet ou d'un intervalle au cours du temps, sans que cela ne né-

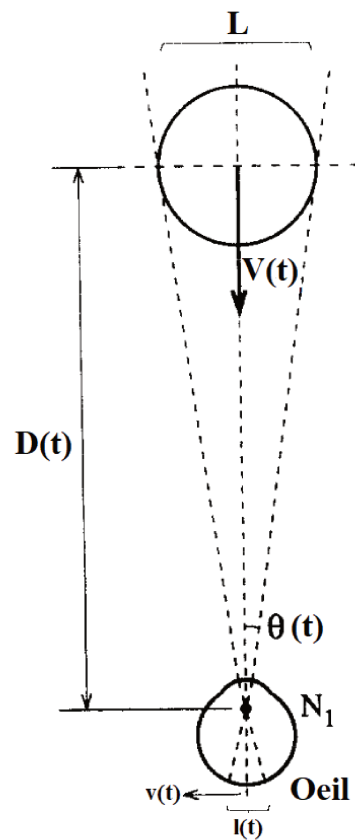


FIGURE 6 – Une sphère rigide de diamètre L bouge à une vitesse $V(t)$ le long d’une ligne passant par le centre N_1 de l’œil de l’observateur. À l’instant t , la distance du centre de la sphère au point N_1 est $D(t)$, et $\theta(t)$ correspond à l’angle visuel. $l(t)$ correspond à la projection rétinienne de la sphère, et $v(t)$ la vitesse d’expansion de $l(t)$ sur la rétine. Adapté de [Regan1993].

cessite de traitement ou calcul théorique de la part de l’observateur.

Si des études se sont intéressées au temps avant contact et à τ dans un contexte général (*e.g.* [Lee1976, Bootsma2003, Gray2006] sur les freinages en voiture, [Demetre1992, Hancock1997] sur les traversées de route) ou animal (*e.g.* [Lee1981] sur les techniques de pêche des fous de Bassan), d’autres études se sont intéressées à leur utilisation en milieu sportif [Savelsbergh1991, Bootsma1992, Brault2009, Brault2012, Watson2011, Correia2011]. Par exemple, Correia et al. (2001) ont montré que τ et le temps avant contact pouvaient être des variables intéressantes dans la prédiction de passe en rugby [Correia2011]. En effet, une relation forte a été observée entre la durée de la passe et le temps avant contact initial entre le joueur qui a effectué la passe et le défenseur : le temps avant contact prédisait 64% de la variance observée dans la durée des passes réalisées. Ces résultats suggèrent que la prise de décision pour les passes à effectuer (courtes ou longues) pourrait être basée sur les

informations fournies par le temps avant contact du défenseur sur le porteur du ballon. Ainsi, les notions de Tau et de temps avant contact présentent des possibilités intéressantes pour prédire ou évaluer un événement particulier dans le domaine du sport (*e.g.* la fermeture d'un intervalle, la collision avec une balle ou un joueur).

Bearing angle

Cependant, Tau possède certaines limites, en particulier dans les activités impliquant des interceptions ou des évitements de collisions [Lynch2018]. En effet, Tau est défini uniquement en fonction de vitesses, et prend comme référence l'œil et non une autre partie du corps (*e.g.* la main pour intercepter une balle en basket-ball ou le pied pour intercepter une balle en football). De plus, Tau fournit des informations prospectives sur le timing d'un événement déterminé, mais les distances et événements à venir sont aussi importants dans des tâches complexes comme l'interception d'un objet mobile, par exemple [Andersen2001]. Si l'explication de ce type d'interception trouve plusieurs solutions dans la littérature (voir par exemple [Fajen2004, Fajen2007]), la théorie du *constant bearing angle* (= angle de relèvement de la cible) a été largement explorée. Cet angle, défini comme l'angle formé entre l'axe exocentrique de référence et la direction observateur-objet (voir Figure 7), permet de prédire l'interception d'une cible mobile : en effet, lorsque θ est maintenu constant, c'est-à-dire lorsque $d\theta/dt$ est nul, l'agent interceptera le mobile [Chardenon2002, Chardenon2004, Chardenon2005, Bootsma2016]. De plus, Bootsma et al. (2016) ont souligné le fait que dans le cas d'un observateur immobile, l'angle θ est toujours défini, tandis que les angles β (= angle de gisement) et ϕ (= direction de déplacement de l'agent) ne le sont pas (voir Figure 7) [Bootsma2016]. Dès lors, la théorie du *constant bearing angle* permet de s'intéresser au mouvement d'interception latérale de balles, à tout instant.

Dans ce contexte, la prédiction d'interception de mobile ou d'évitement de collision a été largement étudiée, car la théorie du *constant bearing angle* permet à l'agent d'adapter son mouvement aux contraintes de l'environnement tout au long de la tâche [Lenoir2002, Fajen2004, Chardenon2005]. De plus, dans le domaine d'interception de balle, son intérêt a été exploré pour des trajectoires curvilignes [Bastin2006] ou rectiligne [Craig2009]. En effet, le *constant bearing angle* apporte un caractère prospectif au contrôle du mouvement, car il apporte des informations qui spécifient le besoin ou non pour l'agent de modifier sa vitesse et/ou sa direction [Bastin2010] : lorsque l'angle de relèvement augmente, la vitesse est donc trop élevée et l'agent doit alors soit ralentir, soit modifier sa direction pour intercepter/éviter la cible mobile.

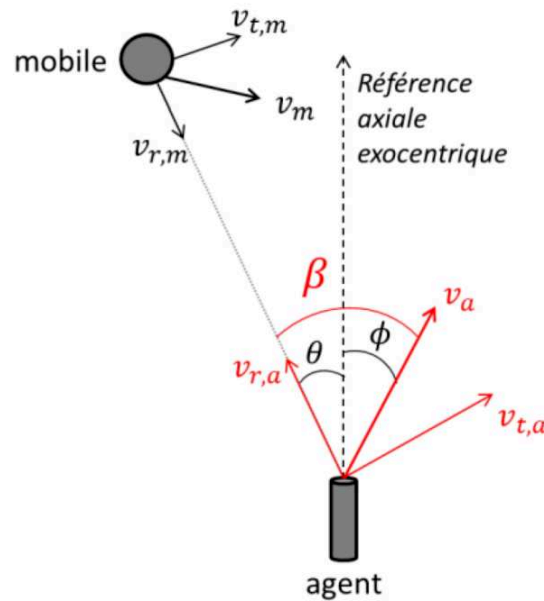


FIGURE 7 – Définition des variables optiques lors de l’interception d’un agent se déplaçant librement dans un plan. θ représente l’angle de relèvement de la cible, ϕ la direction de déplacement de l’agent et β l’angle de gisement. D’après [Ledouit2015].

En ce sens, la continuelle adaptation de l’agent à la situation présente non seulement une adaptation dynamique ne nécessitant aucun traitement particulier, mais aussi une vision prospective de l’activité d’interception/d’évitement.

1.1.2.2 Affordances

Au centre de la pensée Gibsonienne se trouve un concept fondamental, celui d’*affordance*, qui renvoie aux possibilités d’actions suggérées à un observateur par l’environnement dans lequel il évolue. Percevoir les affordances relève alors à la fois de l’observateur, et de l’environnement, ce que Gibson traduit de la manière suivante :

”[A]n affordance is neither an objective property nor a subjective property; or it is both if you like. An affordance cuts across the dichotomy of subjective-objective and helps to understand its inadequacy. It is equally a fact of the environment and a fact of behavior. It is both physical and psychical, yet neither. An affordance points both ways, to the environment and to the observer” ([Gibson1979], p.129)

En ce sens, elle est une notion complexe, dynamique, et spécifique à la situation et à l’observateur. Au regard des travaux antérieurs notamment de James Gibson

[Gibson1966, Gibson1979] et Michael Turvey [Turvey1992, Turvey1995, Turvey1999], ce caractère complexe a été mis en lumière par [Fajen2009] au travers de plusieurs traits caractéristiques des affordances :

- o **Les affordances sont réelles.** L'existence des affordances en tant qu'entités ontologiques suppose qu'elles peuvent fournir des informations concrètes à l'observateur. En ce sens, elles n'ont pas besoin d'être perçues comme des processus cognitifs, mais peuvent être directement perçues.
- o **Les affordances sont spécifiques à l'espèce.** Les affordances ne sont pas inhérentes aux objets ou environnements eux-mêmes, mais s'inscrivent dans un contexte plus large, spécifique à l'espèce et à son développement, signifiant qu'elles sont définies relativement à l'espèce qui la perçoit, et à ses capacités ou possibilités. Par exemple, un ballon de rugby suggérera l'action d'être lancé par un homme, mais pas par un lémurien ou un poisson-clown.
- o **Les affordances "capturent" la réciprocité de la perception et de l'action.** Les affordances décrivent l'environnement en termes de possibilités d'actions par l'individu, et en ce sens, la perception est un système global et dynamique. En effet, la perception sert l'action, et l'action est contrôlée par la perception. En particulier, [Gibson1979] insiste sur le fait que la perception et l'action doivent être considérées conjointement plutôt que séparément (comme traditionnellement abordées par les théories cognitivistes). C'est entre autres pour cette raison que le concept d'affordances convient particulièrement bien à l'étude des compétences perceptivo-motrices mises en jeu dans le(s) sport(s).
- o **Les affordances permettent un contrôle prospectif.** Percevoir les affordances, c'est permettre à l'agent un contrôle prospectif de son comportement [Turvey1992, Turvey1995]. Les mouvements sont basés sur les indices données à propos de l'état futur de la situation. De manière plus générale, le contrôle prospectif se rapporte aux moyens mis en jeu par l'agent pour adapter son comportement avant et pendant l'action, selon les contraintes et évolutions de l'environnement. En ce sens, la perception joue à la fois un rôle préparatoire à l'action, mais aussi régulateur. Dans le domaine du sport, cette adaptation à l'environnement et à ses contraintes est essentielle pour produire des actions et réactions adaptées, efficaces et efficientes.
- o **Les affordances sont porteuses de sens.** Plutôt qu'une perception de l'environnement en termes de propriétés neutres et fondamentales, qui sous-tendrait l'idée d'un traitement cognitif complexe de l'information, Gibson met au centre de sa théorie une perception directe : les affordances sont en elles-

mêmes porteuses de sens pour l'individu qui les perçoit, et décrivent implicitement ce qu'il peut ou ne peut pas faire dans l'environnement considéré.

- o **Les affordances sont dynamiques.** Comme déjà évoqué précédemment, "*we must perceive in order to move, but we must also move in order to perceive*" ([Gibson1979], p.223) : ainsi, les opportunités d'action vont et viennent avec les mouvements et comportements réalisés dans l'environnement considéré. Elles se construisent et se déconstruisent au fur et à mesure que la situation évolue, par une action de l'agent et/ou une modification de l'environnement. Dans le contexte sportif, par exemple, un joueur de rugby porteur de balle peut percevoir à un instant donné un intervalle entre deux défenseurs qui lui permettrait de franchir la ligne de défense, mais voir cet intervalle se refermer quelques secondes plus tard par un rapprochement des deux défenseurs ou l'intervention d'un troisième défenseur. Ainsi, l'affordance a évolué avec la situation et l'action du(des) joueurs(s) impliqué(s) dans celle-ci.

Les affordances peuvent être perçues comme des propriétés spatio-temporelles de l'environnement, à la fois objectives mais aussi subjectives (car liées à la façon dont elles sont perçues, et à l'individu qui les perçoit). Deux grands types d'affordances sont alors à distinguer : les affordances liées aux paramètres anthropomorphiques de l'individu (*body-scaled*), et les affordances liées à la capacité ou non de réaliser l'action (*action-scaled*). Les *body-scaled* affordances déterminent la possibilité ou non de l'individu de réaliser l'action en fonction d'une ou plusieurs de ses caractéristiques physiques. Par exemple, une marche de 20 cm de hauteur sera perçue comme pouvant être montée en marchant pour un adulte (taille des jambes suffisamment grande), mais plutôt en "escaladant" pour un jeune enfant (taille des jambes trop petite) (Figure 8). Le contexte de la situation, lui aussi, influence les choix, et une même affordance peut amener des actions différentes (Figure 9). Les *action-scaled* affordances prennent en compte les capacités d'un individu pour déterminer la possibilité ou non de réaliser l'action. Soulever un tonneau d'environ 20 kilogrammes sera perçu comme possible pour un adulte de 20 ans, mais pas pour un enfant de 5 ans. Cependant, comme souligné par [Fajen2009], toutes les affordances ne peuvent pas être rangées dans l'une ou l'autre des catégories, mais peuvent appartenir à la fois aux deux catégories, comme c'est souvent le cas pour les affordances dans le domaine sportif. Par exemple, la possibilité d'effectuer un bloc en volley-ball sera déterminée à la fois par des caractéristiques anthropomorphiques (taille du joueur et longueur de ses bras), mais aussi par des capacités physiques (détente verticale) [Pepping1997].

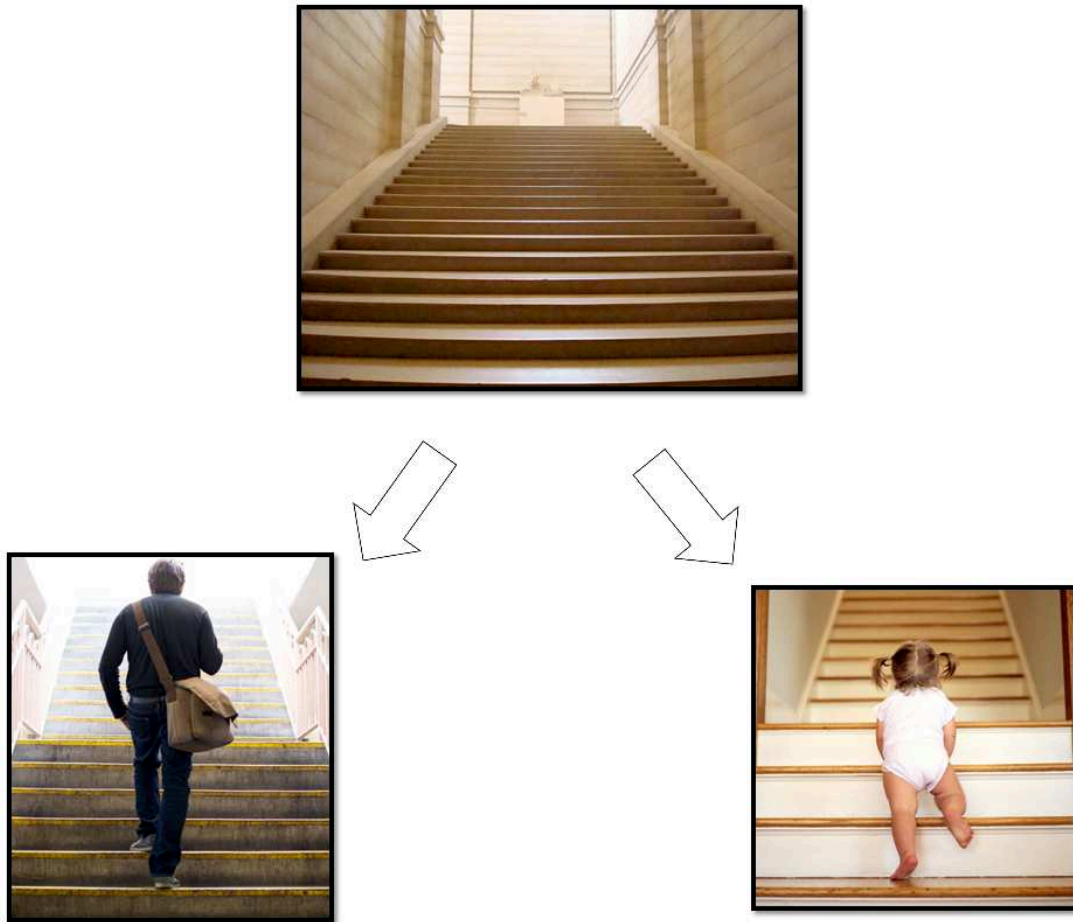


FIGURE 8 – Une même affordance (l'escalier) suggère deux manières de réaliser la tâche, pour deux individus aux caractéristiques différentes : ici, en marchant pour l'homme, en "escaladant" pour l'enfant.

Un exemple probant et connu de la littérature réside dans l'étude de [Warren1984]. L'auteur a demandé à des sujets d'évaluer la possibilité ou non de monter des marches de hauteurs variables, et a observé que les sujets les plus grands évaluaient des marches plus hautes comme pouvant être montées (= "montables"), comparés aux sujets les plus petits (Figure 10.A, traduisant la capacité des sujets à percevoir l'affordance en fonction de leurs propres caractéristiques physiques. Cependant, lorsque William Warren a normalisé la taille de la marche par celle des jambes des sujets, il a observé que tous les sujets répondaient de façon homogène (Figure 10.B) : d'un point de vue relatif, les sujets ont donc perçu la même affordance, qui était directement significative pour eux, mettant en avant le lien important qui existe entre l'individu et l'environnement. Dans une autre étude, Warren et Whang ont cherché à approfondir ces observations, en demandant à des sujets de juger de la "passabilité" de portes de différentes largeurs [Warren1987]. Des résultats de même nature ont été

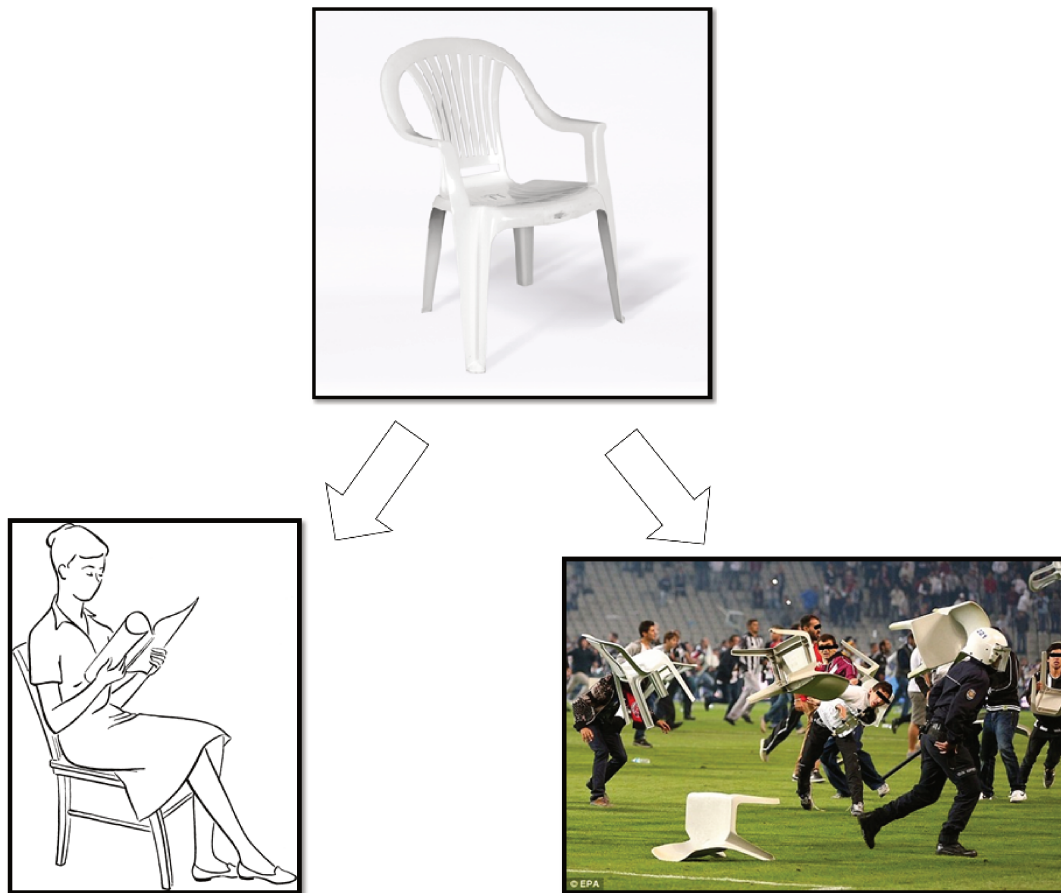


FIGURE 9 – Une même affordance (la chaise) suggère deux actions différentes, en fonction de la situation : ici, s’asseoir pour lire un livre, ou la saisir et la lancer sur quelqu’un.

observés, les sujets ayant les épaules les plus larges jugeant les portes comme moins "passables" que les sujets ayant les épaules les moins larges. De plus, là encore, cette différence disparaissait lorsque l'on considérait le ratio entre la largeur de la porte et la largeur d'épaule des sujets. Dès lors est défini le moment où le sujet considère qu'il ne peut plus franchir la porte, et devra donc adapter son mouvement à la situation, par exemple en tournant les épaules.

Ainsi, depuis les fondations posées par Gibson, de nombreux travaux se sont attachés à affiner et compléter la notion d'affordance. Outre ses aspects théoriques, il a également été montré qu'il était possible de percevoir des affordances dans des domaines très variés, comme lors d'une montée de marches [Warren1984], du franchissement d'un fossé [Cornus1999] ou d'un intervalle [Warren1987], ou encore le passage au-dessous d'un obstacle [van der Meer1997]. Dans ce contexte, la perception et l'action sont liées dans un cercle continu, et l'affordance permet un contrôle

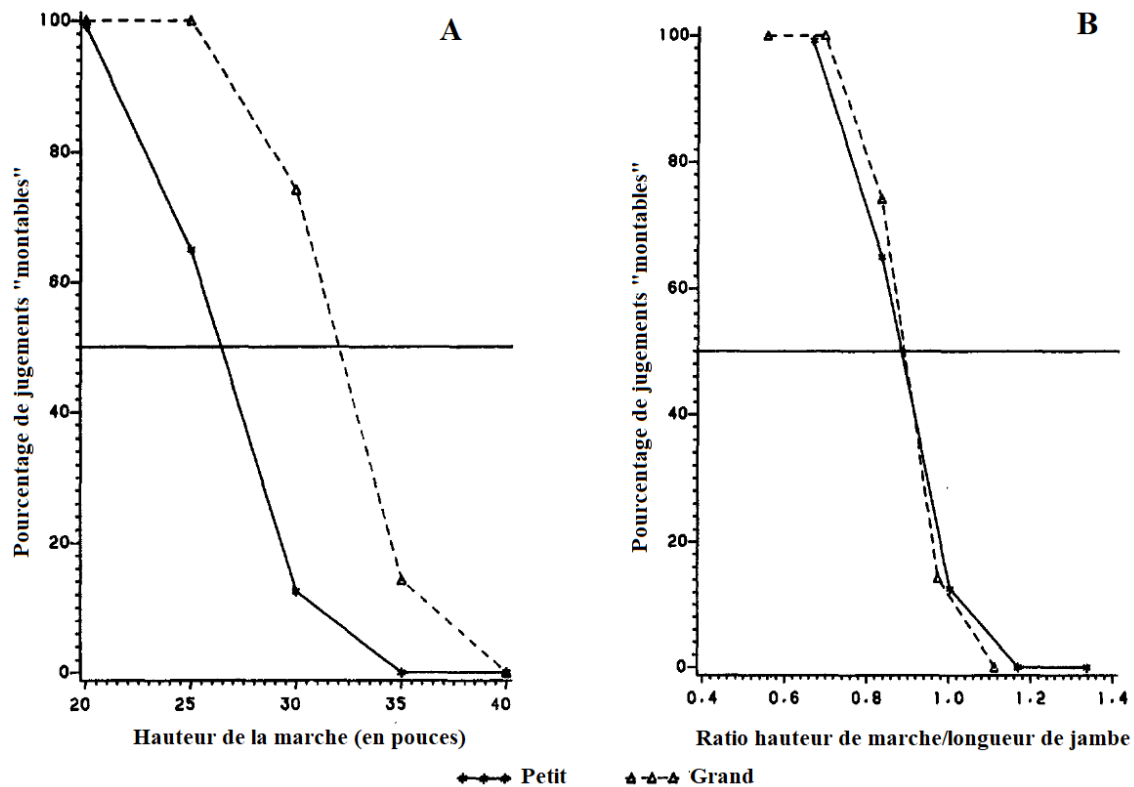


FIGURE 10 – A. Pourcentage de jugement du caractère "montable" de la marche, en fonction de la hauteur de la marche (en pouces). B. Pourcentage de jugement du caractère "montable" de la marche, en fonction du ratio entre la hauteur de la marche et la longueur de la jambe du sujet. D'après [Warren1984]

prospectif du mouvement. De plus, la plupart de ces tâches peuvent trouver écho dans le sport [Fajen2009], et certains travaux ont déjà exploré ce type de situations (*e.g.* [Peper1994, Pepping1997, Watson2011]). Dans le domaine sportif, [Travassos2012] ont montré, dans une étude sur l'interception de balle en futsal, que la décision d'un défenseur d'intercepter une passe était fortement contrainte par sa position relative par rapport à la trajectoire de balle : les joueurs ont donc utilisé l'information disponible à un instant donné, mais aussi l'évolution de cette information pour adapter leur mouvement, et adopter un contrôle *in situ* de leur propre action d'interception dans une situation dynamique et complexe.

Cependant, il est à noter que plusieurs limites de la théorie des affordances persistent. Premièrement, les affordances sont-elles suffisantes pour expliquer et guider l'ensemble des actions réalisées ? En effet, prenons l'exemple simple de deux robinets d'apparence identique. Le premier s'ouvre en tournant le robinet de gauche à droite, mais le second s'ouvre en levant le robinet de bas en haut. Du fait de leur parfaite ressemblance, rien ne permet d'emblée de comprendre qu'ils ne s'ouvriront pas de la

même manière. Il est donc fort probable qu'un utilisateur ayant ouvert correctement le premier se trouvera confronté à un échec la première fois qu'il tentera d'ouvrir le second. Seulement, la deuxième fois que l'utilisateur ouvrira les robinet, il ne devrait plus faire d'erreur, et aura appris à ouvrir chacun de la bonne façon, alors même que les affordances de la situation n'ont pas été modifiées. L'apprentissage des actions à réaliser dans cette situation suppose donc l'intervention d'un ou plusieurs autres processus de perception et/ou traitement de l'information disponible. De manière plus générale, on pourrait avancer que si l'affordance permet d'expliquer comment le choix d'action est réalisé, elle ne permet pas de mettre en avant la manière dont l'action a été apprise pour être ensuite réalisée. Ceci pose alors la question de l'apprentissage, de ce qui est appris, et la manière dont l'individu apprend à construire une loi de contrôle [Warren1988] et à établir une correspondance entre les invariants perceptifs et le mode de coordination établit pour réaliser l'action [Fowler1978]. Deuxièmement, parmi l'ensemble des actions possibles à réaliser, nous n'en réalisons qu'une infime partie, très spécifiques à la situation. Par exemple, comme l'indique l'exemple de la figure 9, la plupart du temps, une chaise invite à s'asseoir dessus ; mais peut aussi suggérer l'action d'être saisie puis lancée. Ainsi, parmi les innombrables affordances simultanées, il s'agirait de préciser la mesure dans laquelle la chaise nous invite plus à nous asseoir qu'à être lancée ou escaladée pour danser le sirtaki. C'est d'ailleurs un problème implicite que soulève William Warren :

"Any given situation affords many actions for a particular organism but no affordance acts like a stimulus to cause behaviour." ([Warren1988], p.344)

En effet, il semble bien que la situation offre un grand nombre d'actions pour un individu, mais ne spécifie pas directement l'action, traduisant dès lors l'importance du contexte et de l'intention de l'individu. Troisièmement, les affordances devraient prendre en compte la variabilité des mouvements humains [Franchak2014]. En effet, l'affordance est vue comme une catégorisation d'actions (par exemple, possible ou impossible), et l'atteinte d'un point critique permet/provoque le passage de l'une à l'autre ([Warren1987, Carello1989], voir aussi Figure 11.A). Seulement, les affordances ne sont pas catégorielles, car la performance présente des variabilités même lors de la répétition d'un même action [Franchak2014]. Ainsi, il s'agirait plutôt de modéliser l'affordance selon une fonction de probabilités (voir Figure 11.B), qui permet d'inclure tous les points et donc de mieux prendre en compte la variabilité observée dans la réalisation d'actions. Forts de ces constats, il nous apparaît alors important de considérer les affordances comme des opportunités générales pour l'ac-

tion s'appuyant également sur les évolutions dans la réponse observée. En effet, et en particulier lorsque l'on s'intéresse aux tâches humaines, l'approche des affordances ne doit pas être perçue comme dichotomique mais plutôt comme une fonction qui prend en compte les variabilités (humaines, environnementales, etc.) de la situation et de la réponse. Ainsi, pour la suite de nos travaux, nous tâcherons de mettre en avant cette notion de variabilité, et de la prendre en compte dans nos analyses.

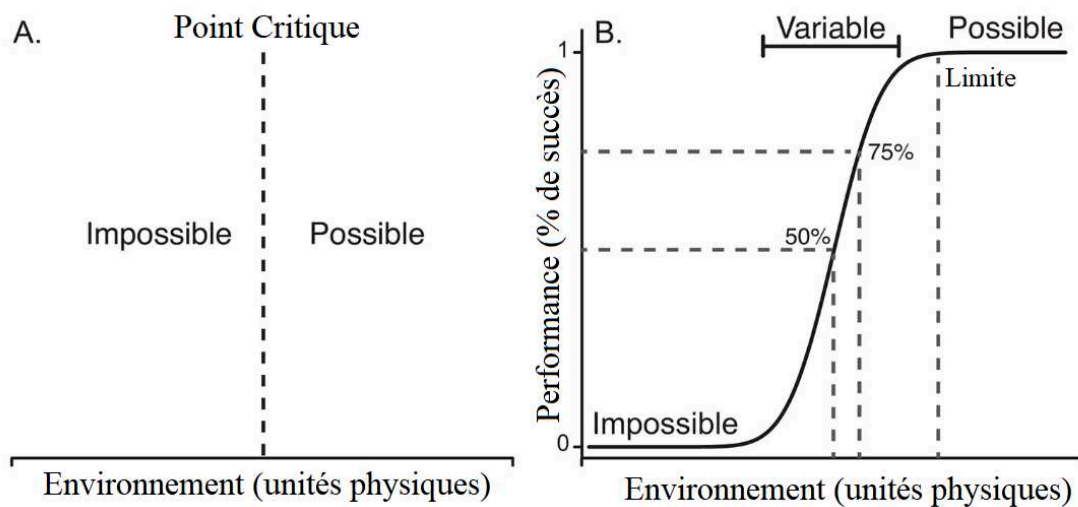


FIGURE 11 – Affordance représentée comme : A. une catégorisation d'actions. Le point critique divise l'environnement en deux espaces distincts où l'action est soit possible, soit impossible, et B. une fonction de probabilités. La fonction définit la probabilité de succès pour chaque unité de l'environnement. D'après [Franchak2014].

Ainsi, l'approche cognitive place le cerveau au centre du traitement de l'information et du choix de la commande appropriée, tandis que l'approche écologique établit un lien plus direct et réciproque entre perception et action. Quand le traitement computationnel proposé par l'approche indirecte permet d'expliquer par exemple les illusions visuelles (voir par exemple le vase de Rubin ou l'illusion de Müller-Lyer) par des erreurs de traitement de l'information, elle n'explique en revanche pas la rapidité et l'efficacité de la perception visuelle dont rend compte l'approche directe. Pour la suite de nos travaux, nous nous proposerons de nous placer principalement dans ce cadre écologique, qui répond bien aux contraintes temporelles et spatiales qui nous sont propres, dans le cadre de situations d'interactions. Toutefois, il est à noter que bien que souvent opposé, ces approches ne sont pour autant pas incompatibles, et l'approche cognitive permettrait par exemple d'expliquer certains manquements de l'approche écologique (l'action qui est apprise et la restitution des apprentissages passés, par exemple). Si la compréhension de la prise de décision et de la façon dont s'organise le couplage perception-action a été largement étudiée

dans la littérature, il apparaît que, dans le domaine sportif, beaucoup d'actions sont réalisées en impliquant plusieurs personnes. Ainsi, la coordination entre les individus résulte de l'analyse et l'échange d'information entre les individus, la tâche et les contraintes de l'environnement, pour prendre une décision et agir. De plus, les situations sportives mettent souvent en jeu des situations à fortes contraintes temporelles, et limitent alors fortement la communication entre joueurs. Dès lors, étudier la coordination interpersonnelle émergente semble intéressant dans ce type de situation, pour comprendre la façon dont émerge l'action dans un contexte complexe et dynamique impliquant plusieurs individus.

1.2 Coordination interpersonnelle et interférence

"Interpersonal coordination is the degree to which the behaviors in an interaction are non-random, patterned or synchronized in both timing and form." ([Bernieri1991], p.403)

Dans la vie quotidienne, les gens interagissent souvent les uns avec les autres, et dans la plupart de nos actions, nous n'agissons pas seuls. Que ce soit pour se croiser dans une rue bondée, jouer ensemble au rugby ou encore déplacer collectivement une machine à laver, les interactions sociales sont omniprésentes. Toutes ces interactions nécessitent de la part des individus de se coordonner, à différents niveaux (*e.g.* coordination des mouvements physiques, activité cognitive commune, discussion verbale, etc.). Au regard de ces observations et de la définition de [Bernieri1991] évoquée ci-dessus, Cornejo et al. (2017) ont établi que la coordination interpersonnelle devait satisfaire plusieurs attributs : 1) c'est un phénomène social impliquant deux individus ou plus ([Bernieri1988, Schmidt2008, Marsh2009]); 2) elle intervient lors d'interaction simultanée face-à-face (*i.e.* elle nécessite la présence réelle et simultanée de deux individus ou plus) ([Bernieri1991]); et 3) elle émerge rapidement et spontanément (*i.e.* sans contrôle conscient ou intentionnalité) de la situation [Issartel2007, van Ulzen2008, Miles2010, Coey2011, Demos2012, Davis2016].

De manière générale, le phénomène de coordination interpersonnel a été vu comme une synchronisation temporelle spontanée des mouvements corporels entre le ou les individus engagé(s) dans l'interaction sociale, dans un environnement déterminé [Bernieri1988]. Dans certaines situations, une rupture de cette coordination sociale peut avoir des conséquences dramatiques, comme par exemple la désorganisation d'une équipe de pompiers luttant contre un incendie qui mènerait à des risques importants, voire des dangers de mort [Shockley2015]. Ainsi, la coordination interpersonnelle prend une place grandissante dans les champs de recherche actuels, et

peut prendre de nombreux aspects dans des disciplines variées comme la psychologie, les sciences cognitives, les neurosciences ou encore les sciences du sport. Bien que la recherche autour de l'action conjointe se soit développée au cours des dernières années, notamment par l'avancée des moyens technologiques d'étude [Cornejo2017], il reste encore beaucoup d'aspects inconnus ou flous sur la façon dont nous coordonnons nos actions avec les autres, et en particulier sur la compréhension général de ce phénomène. Si les méthodes et les moyens d'analyses s'enrichissent et se diversifient, ces avancées ont cependant introduit la difficulté d'identifier des modèles de coordination précis et reproductibles [Shockley2015].

1.2.1 Coordination rythmique

L'une des formes les plus basiques de coordination interpersonnelle (voir détails partie 1.2.2) est la synchronisation ou coordination rythmique des mouvements de plusieurs personnes les unes avec les autres. Cette coordination peut reposer sur une partie du corps (voir par exemple [Schmidt1990, Schmidt1994, Richardson2008]) ou à l'échelle d'un ou plusieurs individus (voir par exemple [Néda2000, van Ulzen2008]). Un exemple probant de cette coordination rythmique peut être trouvée dans le phénomène du "clapping", initialement lancé par l'équipe d'Islande de football lors de l'Euro 2016 de football (voir Figure 12), puis ensuite repris par nombre d'équipes sportives. Au-delà de ses aspects festifs et participatifs, le "clapping" islandais représente en effet une formidable manifestation de coordination rythmique à l'échelle de nombreux individus. De cet exemple émane un aspect scientifique particulièrement intéressant : de quelle manière les individus établissent-ils une coordination rythmique, et comment peut-elle évoluer selon la situation ? Schmidt et al. (1990) ont été les premiers à montrer que les principes dynamiques régissant la coordination intrapersonnelle pouvaient être appliqués aux patterns de coordination interpersonnelle ([Schmidt1990]). Dans leur étude sur la balancement de jambe, ils ont montré que la synchronisation du balancement entre deux individus et entre les deux jambes d'un individu reposait sur le même mode de coordination (*i.e.* synchronisation en phase ou en anti-phase), et que la coordination en anti-phase présentait une moindre stabilité : en effet, lorsque la fréquence augmentait, la coordination changeait pour aller vers un pattern de synchronisation en phase, et seule cette coordination en phase pouvait être maintenue. Ainsi, il est intéressant de noter que la synchronisation entre les jambes de deux individus peut être étudiée et modélisée selon des principes dynamiques similaires à la synchronisation de deux jambes d'un unique individu. De plus, il est particulièrement intéressant de souligner que l'interaction d'un individu avec son environnement -ou avec un autre individu- émane dynamiquement

d'un contexte de contraintes (les "contraintes" doivent ici être comprises comme la façon dont les choses peuvent s'assembler physiquement, les *patterns de la nature* [Stevens1974]), et sans qu'une approche neuronale (*e.g.* les neurones miroir) ne soit un facteur déterminant pour comprendre les patterns de coordination qui émanent de la situation [Schmidt2011]. Une approche dynamique permet dès lors d'étudier la coordination rythmique de mouvements à l'échelle d'un individu, mais aussi de plusieurs individus.

Cependant, dans la vie quotidienne et en particulier dans le domaine sportif, la plupart des actions de coordination que nous rencontrons et réalisons nécessitent une synchronisation complexe, multidimensionnelle, plutôt qu'une synchronisation rythmique de mouvements. Comme souligné par Benerink (2017), l'intérêt de ces études sur la coordination rythmique réside dans la mise en lumière de l'importance de considérer la coordination non pas à l'échelle "locale" de l'individu, mais à l'échelle "globale" de l'ensemble des individus et environnements impliqués. Ainsi, plutôt que de se concentrer sur les actions des individus séparément, les études portant sur l'organisation comportementale d'actions conjointes devraient se focaliser sur les aspects dynamiques à l'échelle interpersonnelle.



FIGURE 12 – "Clapping" de l'équipe d'Islande et de ses supporters durant l'Euro 2016 de football.

1.2.2 Coordination et action conjointe

L'on peut distinguer deux grands types de coordination : intrapersonnelle et interpersonnelle. Dans un contexte de dynamique de coordination intrapersonnelle, on parle de coordination des mouvements à l'échelle d'un individu et de son système musculo-squelettique (*e.g.* coordination des actions réalisées par ses deux mains). Dans un contexte de dynamique de coordination interpersonnelle, on s'intéresse à l'activité collaborative exercée par plusieurs participants pour atteindre un objectif commun [Richardson2015]. La coordination émane alors de la situation qui guide l'information et le couplage d'actions entre les différentes composantes du système (*i.e.* à l'échelle d'un individu, voir par exemple [Kelso1981], ou à l'échelle de plusieurs individus, voir par exemple [Richardson2015]). Dans l'étude de la coopération entre plusieurs individus (comme c'est le cas dans cette thèse), on va donc essentiellement s'attacher à la coordination interpersonnelle. Dans ce contexte, l'action conjointe correspond donc à l'action réalisée par (au moins) deux individus, de manière collaborative, afin d'atteindre un but partagé par tous. Ici, l'étude de l'action conjointe présente beaucoup de similarité avec l'étude du couplage perception-action chez l'individu, car toutes deux cherchent à établir les patterns et similarités qui sous-tendent l'interaction dynamique entre l'individu et son environnement [Marsh2006, Marsh2009, Richardson2010], cet environnement pouvant être composé d'objet(s) (mobile(s) ou non), un (des) autre(s) individu(s), ou les deux. Ainsi, l'approche écologique se focalise sur l'information qui guide l'action, et la relation réciproque qui existe entre les deux. Que ce soit à l'échelle d'un ou de plusieurs individus, ce couplage qui existe entre l'agent et son environnement permet de rendre compte du comportement émergent au niveau de l'individu [Benerink2017]. Dès lors, cette relation étroite entre couplage perception-action et action conjointe offre un cadre d'analyse intéressant, et de nombreuses études se sont attachées à l'explorer dans des tâches de coordination rythmique, mais aussi des tâches plus complexes comme des activités quotidiennes ou sportives.

La coordination interpersonnelle dans des tâches d'action conjointe a été largement explorée dans la littérature. La plupart de ces études se sont attachées à étudier la façon dont des dyades, des binômes réalisent des actions ensemble, en collaborant. En d'autres termes, elles se sont intéressées à la façon dont plusieurs individus constituent un système de coordination (*i.e.* une synergie) qui émerge de l'influence mutuelle des individus qui interagissent. La présence ou absence de contraintes, dans ce contexte, constituent les mécanismes qui permettent ou empêchent certains états du système [Benerink2017] et les participants réalisant la tâche devront appréhender et utiliser ces contraintes pour atteindre l'objectif commun fixé. Dans ce sens,

Ramenzoni et al. (2011, 2012) ont étudié la coordination interpersonnelle manuelle et posturale lors de l'exécution d'une tâche motrice simple et demandant une grande précision. Dans leur étude, un sujet tenait un anneau tandis que l'autre sujet insérait un pointeur dans le cercle et devait le maintenir à l'intérieur sans toucher les côtés [Ramenzoni2011, Ramenzoni2012]. La taille de l'anneau était variable pour manipuler la difficulté de la tâche. Les auteurs ont enregistré les mouvements de la main et le mouvement du torse (*i.e.* le balancement postural) des sujets, et ont montré que les individus adoptaient une coordination flexible au niveau intrapersonnel (*i.e.* modification de la posture) afin de stabiliser la coordination au niveau interpersonnel (*i.e.* performance stable dans la tâche). Cela se traduisait par une variation de mouvements au niveau collectif (*i.e.* au niveau de la dyade) significativement plus faible que la somme des variations de mouvements au niveau des individus. Cela suggère donc que les coordinations interpersonnelle et intrapersonnelle sont affectées par la nature de la tâche effectuée et par les contraintes qu'elle impose à la performance collective, mais aussi que les individus sont capables d'adapter leurs propres mouvements pour optimiser la tâche commune. En ce sens, les comportements et actions des individus émergent de la situation et d'un processus d'auto-organisation qui élève les individus à un niveau commun, un "ensemble fonctionnel unifié" [Benerink2017]. Il apparaît alors important de s'intéresser aux lois et relations qui régissent l'évolution de ce système organisé.

Pour étudier cette coordination interpersonnelle dans une tâche coopérative et complémentaire, Richardson et al. (2015) ont demandé à des participants, par équipes de deux, de bouger un stimulus informatique d'avant en arrière entre deux cibles prédéfinies, de manière continue, tout en évitant d'entrer en collision avec le stimulus du partenaire ([Richardson2015], voir Figure 13). Comme les axes de croisement des deux partenaires étaient perpendiculaires, (Figure 13.C), les participants devaient coordonner leurs actions pour éviter les collisions durant les essais. Les auteurs ont trouvé que les paires de participants étaient capables de rapidement adopter un pattern stable et asymétrique de coordination de mouvements, pour réaliser la tâche en tant qu'équipe, via l'émergence de comportements, d'actions dynamiques et complémentaires. De plus, ce pattern asymétrique de coordination était aussi caractérisé par une phase de décalage, de retard entre les participants, essentielle à la bonne réussite de la tâche. L'instauration de ce pattern stable est expliquée par la régulation *in situ* des comportements des individus, et met en avant la capacité des binômes à mettre en place une coordination spontanée et complémentaire pour la réalisation d'une tâche commune, dans une situation où la communication verbale était interdite (et rendait donc impossible l'établissement à l'avance d'un plan commun d'action).

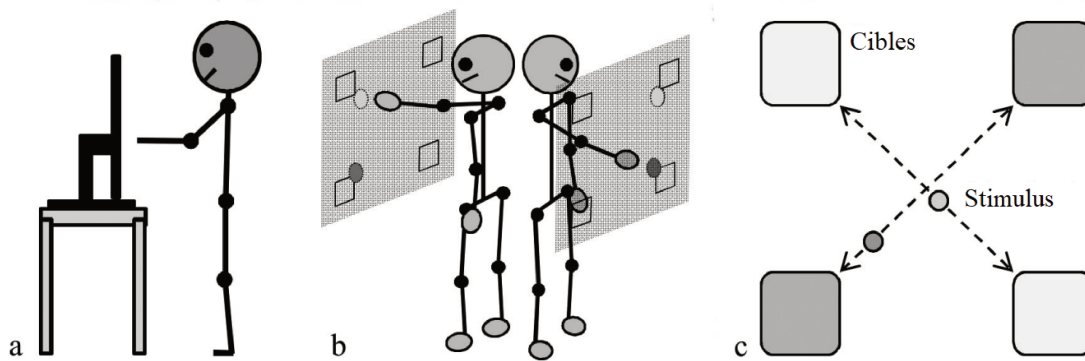


FIGURE 13 – Représentation du setup expérimental utilisé : A. pour un individu et B. pour deux individus. La figure C. représente la tâche effectuée : les deux individus doivent déplacer le stimulus informatique entre leurs cibles respectives, tout en évitant les collisions, et sans communication verbale. D’après [Richardson2015]

Rigoli et al. (2015) ont quant à eux examiné la coordination interpersonnelle qui émergeait entre deux participants réalisant une tâche collaborative de contrôle de balle dans un labyrinthe virtuel, dans différentes conditions de pratique (symétrique, asymétrique, déséquilibrée) [Rigoli2015]. Dans la tâche utilisée, les participants devaient le plus rapidement possible emmener une bille jusqu’à une cible en évitant des obstacles, sur un labyrinthe virtuel qu’il était possible d’incliner via deux joysticks pour faire bouger la bille. Dans la condition symétrique, les joysticks contrôlaient à la fois l’axe x et l’axe y du labyrinthe, avec le même ”poids”. Dans la condition asymétrique, un joystick permettait de contrôler l’axe x uniquement, et l’autre permettait de contrôler l’axe y uniquement. Dans la condition déséquilibrée, un joystick avait le contrôle total de l’axe x, mais le contrôle de l’axe y avec un ”poids” de seulement 50%, et l’autre joystick avait le contrôle total de l’axe y, et le contrôle de l’axe x avec un ”poids” de seulement 50%. Il était demandé aux individus d’effectuer la tâche seuls (*i.e.* en contrôlant chaque joystick avec une main) puis à deux (*i.e.* chaque participant contrôlait un joystick). Les auteurs ont avant tout montré que les participants étaient aussi (si non plus) performants à deux que tous seuls, et ce quelle que soit la condition étudiée. Ceci suggère que le succès des tâches individuelles et collectives était défini par la même dynamique comportementale, et que les individus et les binômes ont pu s’adapter aux conditions pour converger vers une dynamique stable et efficace. De plus, il est intéressant de souligner que le fait de ne pas être au courant des conditions de la tâche n’a pas empêché les participants de s’adapter et de réaliser de bonnes performances. Cela implique que la connaissance précise des conditions et du système n’est pas nécessaire pour que les individus convergent vers des comportements stables de coordination lors

de tâches complémentaires d'action conjointe. À ce titre, les auteurs suggèrent que l'action conjointe pourrait être préférable à un contrôle individuel, car mènerait à un meilleur succès dans la tâche, un constat également établi par d'autres auteurs (voir par exemple les récents travaux de [Ganesh2014, Strang2014, Benerink2016] ou encore [van Opstal2018]). Mojtahedi et al. (2017) ont quant à eux étudié l'influence de la configuration spatiale des participants sur leur performance, durant une tâche d'équilibration d'objet (soulever et abaisser un objet, et le maintenir immobile) réalisée seul puis conjointement ([Mojtahedi2017], voir Figure 14). Ils ont trouvé que les dyades étaient plus performantes lorsque la tâche était réalisée côte-à-côte par rapport à face-à-face, mais aussi que les résultats étaient similaires lorsque les individus utilisaient la main dominante et la main non-dominante. Cela signifie que la répartition spatiale des individus a une importance sur la réussite dans la tâche, tandis que l'utilisation d'une main dominante ou non n'influence pas la performance. De plus, le "plus mauvais" des deux participants (relativement aux performances individuelles réalisées avec les deux mains) avait amélioré sa performance lorsqu'il était assisté d'un partenaire, tandis que le "meilleur" n'avait pas amélioré sa performance. Ainsi, les bénéfices qu'apporte la réalisation d'une tâche de manière conjointe ne sont pas linéaires, ne suivent pas une règle établie, mais semblent limités par la performance du "meilleur" des partenaires.

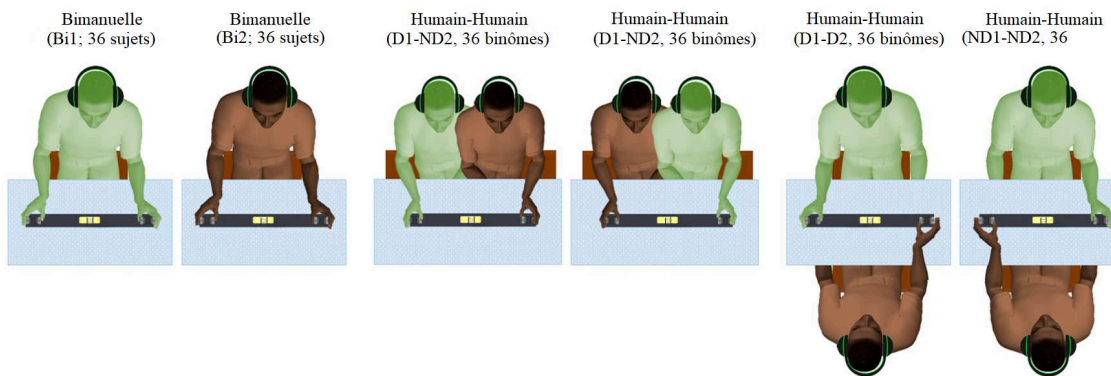


FIGURE 14 – Conditions expérimentales utilisées par [Mojtahedi2017], mettant en jeu une tâche réalisée bi-manuellement (Bi1, Bi2), avec deux mains dominantes (D1-D2), deux mains non-dominantes (ND1-ND2), et enfin une main dominante et une main non dominante (D1-ND2, ND1-D2).

D'autres études ont aussi investigué le rôle des indices disponibles dans la coordination lors d'une tâche conjointe, et ont montré l'importance des informations visuelles [Vesper2014], auditives [Wing2014] ou haptiques [Sofianidis2012] sur la synchronisation des mouvements. Dans une récente étude, Eils et al. (2017) ont demandé à des dyades composées d'un Leader et d'un Follower de réaliser une tâche d'action

conjointe impliquant le corps complet, avec ou non des informations visuelles et haptiques [Eils2017]. Les participants se tenaient debout sur une même planche, et devaient guider une balle virtuelle à travers un labyrinthe jusqu'à un trou en déplaçant conjointement leurs poids sur la planche. La tâche devait être réalisée le plus rapidement possible, et trois conditions différentes ont été étudiées : 1) le Follower ne voyait ni le Leader ni le labyrinthe (*i.e.* pas d'informations visuelles disponibles, uniquement des informations proprioceptives), 2) le Follower voyait le Leader mais pas le labyrinthe, et 3) le Follower voyait le Leader et le labyrinthe. La performance globale était meilleure lorsque les informations visuelles étaient disponibles, en particulier quand le Follower pouvaient voir le labyrinthe et le Leader. Ainsi, deux agents sont capables de coordonner leurs actions et d'utiliser l'information disponible pour synchroniser efficacement leurs mouvements lors d'une tâche d'action conjointe. En particulier, l'information visuelle sur le partenaire et la tâche joue un rôle prégnant dans la construction de représentations communes et de coordinations motrices, afin de prédire l'effet des actions du partenaire et de ses propres actions sur le système dynamique et la tâche à réaliser. De plus, les résultats déjà établis dans la littérature sur la coordination de parties corporelles (*e.g.* membre inférieur [Schmidt1990] ou membre supérieur [Mojtahedi2017]) peuvent être généralisés à des tâches mettant en jeu l'ensemble du corps, et un couplage physique direct entre les partenaires.

1.2.3 Coordination dans le sport

Le contexte sportif, et en particulier les sports collectifs, est porteur de nombreuses interactions entre les joueurs et leur environnement. Les processus d'auto-organisation émergent, là encore, de situations dynamiques complexes (voir par exemple [Araújo2016] dans le contexte général des sports collectifs), des contraintes de l'environnement et du cycle perception-action mis en jeu par les individus. En ce sens, il constitue un important point d'ancrage à l'analyse des interactions, de la coordination et de l'organisation comportementale de systèmes complexes. Dans l'exemple des sports collectifs, les contraintes auxquelles fait face un joueur se situent à de nombreux niveaux (partenaires, adversaires, ballon, arbitre, limites du terrain, etc.), et de ces contraintes émanent nombre de coordinations complexes et diverses. Par exemple, un défenseur en rugby devra à la fois gérer son positionnement défensif par rapport à ses coéquipiers (afin de ne pas laisser d'espace dans la ligne de défense, de ne pas laisser un espace du terrain inoccupé, etc.), mais aussi par rapport aux adversaires (positionnement des joueurs adverses, trajectoire du porteur de balle, etc.), ou à la position de l'action sur le terrain (proche de son propre en-but ou non, etc.).

Dans l'exemple du 1-contre-1 en basket-ball, le défenseur cherche à maintenir l'attaquant à distance du panier, tandis que l'attaquant cherche à dribbler le défenseur afin de marquer un panier. Or, considérant la distance attaquant-défenseur-panier comme paramètre de contrôle de la situation, il a été montré qu'un état stable (*i.e.* des distances fixes), lorsqu'il était rompu par l'attaquant, entraînait une action du défenseur jusqu'à l'atteinte d'un nouvel état stable (*i.e.* des distances fixes, différentes des précédentes, voir [Araújo2004]). En effet, lorsque l'attaquant tente de briser cette symétrie, le défenseur réalise un contre-mouvement afin de maintenir l'état d'équilibre du système. Cela suggère que dribbler dans les sports de balle peut être décrit comme un processus de maintien ou de rupture de la symétrie d'un système à un instant donné [Davids2005]. Dans le domaine du football, Duarte et al. (2012) ont exploré l'influence de la coordination interpersonnelle sur la performance d'un binôme "1 contre 1" attaquant-défenseur [Duarte2012], et ont montré que le succès de l'attaquant reposait en grande partie sur la synchronisation spatio-temporelle et l'imprévisibilité des processus de coordination interpersonnelle, tandis que le succès du défenseur s'expliquait par sa capacité à diriger l'interaction et établir un mode de coordination plus prévisible entre les membres du binôme. En d'autres termes, ces observations établissent que la performance de l'attaquant repose sur sa capacité à créer et exploiter l'imprévisibilité de la situation, quand le défenseur cherche au contraire à contrôler au maximum les actions de l'attaquant pour contraindre ses mouvements et limiter l'imprévisibilité de l'interaction, en "dominant" la relation attaquant-défenseur. De nombreuses études ont été menées pour explorer la dynamique des joueurs de tennis [Palut2005] ou de squash [McGarry2006], de rameurs [Seifert2017], de même que la dynamique attaquant-défenseur en rugby [Correia2016, Passos2018], en basket-ball [Bourbousson2010, Esteves2012] ou en football [Duarte2012].

Dans cette thèse, nous nous sommes particulièrement intéressés à l'action conjointe lors d'une tâche d'interception de balle. Beaucoup d'auteurs ont étudiés l'interception d'un objet [Chardenon2005, Craig2006, Craig2009, Fajen2007, Warren2008, Ledouit2013] ou d'un joueur [Watson2011, Brault2012], mais très peu se sont focalisées sur l'interaction entre deux joueurs ou plus. Parmi ces auteurs, Benerink et al. (2016) ont étudié l'interaction entre deux participants dans une tâche de "Pong collaboratif" : les deux participants devaient interagir afin d'intercepter différentes trajectoires de balle sur un écran, à l'aide de raquettes contrôlées manuellement, tout en évitant les collisions entre eux [Benerink2016]. Ils avaient pour seuls indices d'action un retour visuel sur l'action du partenaire (*i.e.* ils ne pouvaient voir que le mouvement de la raquette du partenaire). Les auteurs ont analysé la façon dont les participants décidaient qui devait intercepter et où, et ont trouvé avant tout que

le pourcentage d'interception était excellent, et les collisions entre partenaires rares. De plus, ils ont établi que la décision de qui devait intercepter la balle émergeait de la situation et de la coopération intrinsèque et tacite qui s'établissait entre les deux participants, "en direct". Ainsi, les participants étaient capables de s'organiser pour réaliser correctement la tâche (*i.e.* peu de collisions et bonne performance), tout en faisant émerger de la situation une coordination, dynamique, stable et efficace. Cependant, il apparaît aussi une zone (située environ au milieu de la zone d'interception) où l'incertitude était plus importante sur qui devait intercepter la balle, menant à des collisions, des essais manqués ou des hésitations (*i.e.* les deux participants initiaient un mouvement d'interception, et l'un d'eux devaient abandonner son mouvement pour éviter la collision). Cela met en avant le fait que la coordination, lorsqu'elle émerge de la situation de manière *online*, peut aussi être porteuse d'incertitude, comme souvent observée dans les sports collectifs.

1.2.4 La coordination et l'interférence : l'exemple des sports collectifs

De nombreuses études ont donc donné des résultats particulièrement intéressants sur la façon dont deux participants coordonnent leurs actions pour réaliser la tâche ensemble, et de manière plus efficace que s'ils l'avaient réalisée seuls. Cependant, ce n'est pas toujours le cas : en effet, il n'est pas rare d'observer des situations où les partenaires interfèrent entre eux, où ils se gênent, par exemple dans une situation sportive, lors d'une réception de chandelle en rugby, d'une réception de service en volley-ball, ou pour attraper une balle en baseball/softball (voir Figure 16). Cette situation d'interférence, de doute et aussi bien connue lors du jeu en double en badminton, où la "zone de divorce" (*i.e.* la zone située entre les deux joueurs) est souvent l'objet de gênes voire de collisions entre les partenaires, et est de fait une zone souvent privilégiée par les adversaires pour attaquer. Bien que leur capacité à coordonner leurs actions pour l'équipe est souvent primordial pour gagner en sport collectif [Silva2013], dans certains cas, cette interférence résulte donc en une situation conflictuelle et en une interception manquée, ou même une collision entre les partenaires. En effet, une coordination motrice importante, de même que des indices visuels plus complexes augmentent la difficulté de la tâche [Vicaria2016], et peuvent dès lors mener à des situations de gêne ou d'incompréhension. Cela suggère, du point de vue du joueur, de continuellement prendre des informations sur les actions des autres, tout en planifiant et exécutant ses propres actions. Ainsi, une modification de l'action de l'adversaire, ou un imprévu dans la tâche à effectuer nécessitera une adaptation de la part de l'individu, afin de réussir la tâche. Schmitz l'illustre avec l'exemple d'un individu réalisant une passe à un autre indi-

vidu [Schmitz2017] : si le passeur réalise une mauvaise passe, ou une passe à laquelle ne s'attendait pas le receveur (*e.g.* passe rapide et directe *vs.* passe lente et "en cloche"), celui-ci devra alors s'adapter, ce qui ne sera pas toujours efficace, en particulier dans les situations à fortes contraintes temporelles. Est alors mise en avant la notion d'anticipation : plutôt que de réagir à la perturbation, l'individu cherchera à planifier et exécuter son action en réponse à l'effet prédit de l'action de son partenaire (*e.g.* [Knoblich2003, Sebanz2006]), afin de limiter les chances d'interférences et de situation de collaboration infructueuse. Dès lors, une question se pose : comment les individus peuvent-ils prédire leurs actions mutuelles, se coordonner efficacement, et comment limiter ces chances d'interférence ?

Plusieurs travaux ont proposé que cette coordination pouvait s'établir à travers la structuration d'une tâche qui réduit les difficultés de coordination, par exemple en s'éloignant des zones partagées et des zones de potentiels conflits [Richardson2011, Richardson2015, Vesper2009] ou en redistribuant la tâche plus efficacement [Brennan2008, Wahn2017]. A titre d'illustration, Richardson et al. (2015) (voir aussi Figure 13 observé des patterns de coordinations stables et asymétriques entre les individus lors de la tâche proposée, ces patterns reposant sur un éloignement de la zone de conflit (*i.e.* l'observation d'un des deux participants adoptant une trajectoire elliptique entre les deux cibles, afin "d'éviter" plus facilement son partenaire) [Richardson2015]. Dans l'étude de Brennan et al. (2008), les auteurs ont demandé à des dyades d'identifier conjointement des cibles sur un écran. Chaque participant était équipé d'un eye-tracker et d'un microphone, et avait accès à différents niveaux d'informations selon les conditions : communication orale uniquement (*i.e.* les participants pouvaient discuter entre eux), regard partagé uniquement (*i.e.* sur leur écran, un point apparaissait pour indiquer ce que le partenaire était en train de regarder), communication orale et regard partagé, ou aucun des deux. La figure 15 présente les résultats observés, et met en avant un point intéressant : les participants, lorsqu'ils avaient accès à la direction du regard du partenaire (*i.e.* Figure 15.A et 15.B), divisaient l'espace en deux parties distinctes, et redistribuaient donc efficacement la tâche, comparé à la situation où ils n'avaient accès à aucune information sur le partenaire (Figure 15.D). Dès lors, cet évitement de zone de conflit et/ou cette redistribution de la tâche suppose d'avoir accès aux informations sur l'action du partenaire, par un moyen "passif" (*e.g.* observation de l'autre et de son action) ou "actif" (*e.g.* communication orale) de partager l'information [Schmitz2017]. À partir de ces informations, l'individu peut percevoir et utiliser ces informations, puis ajuster leur réponse en conséquence, afin de produire -à l'échelle collective- une réponse efficace à la tâche, en planifiant ou adaptant la réponse motrice. Cependant, et en particulier dans le domaine du sport,

il existe de nombreux cas où réduire la difficulté de coordination est difficile, et où la communication est impossible ou inefficace, et les individus doivent alors spontanément trouver une nouvelle forme de communication ou de prise d'information [Galantucci2009]. Dans ce contexte, il apparaît donc intéressant de chercher à comprendre comment se manifeste l'interférence entre partenaires, quels peuvent être les facteurs qui l'influencent, et comment faire en sorte de limiter ses effets dans des situations de coopération.

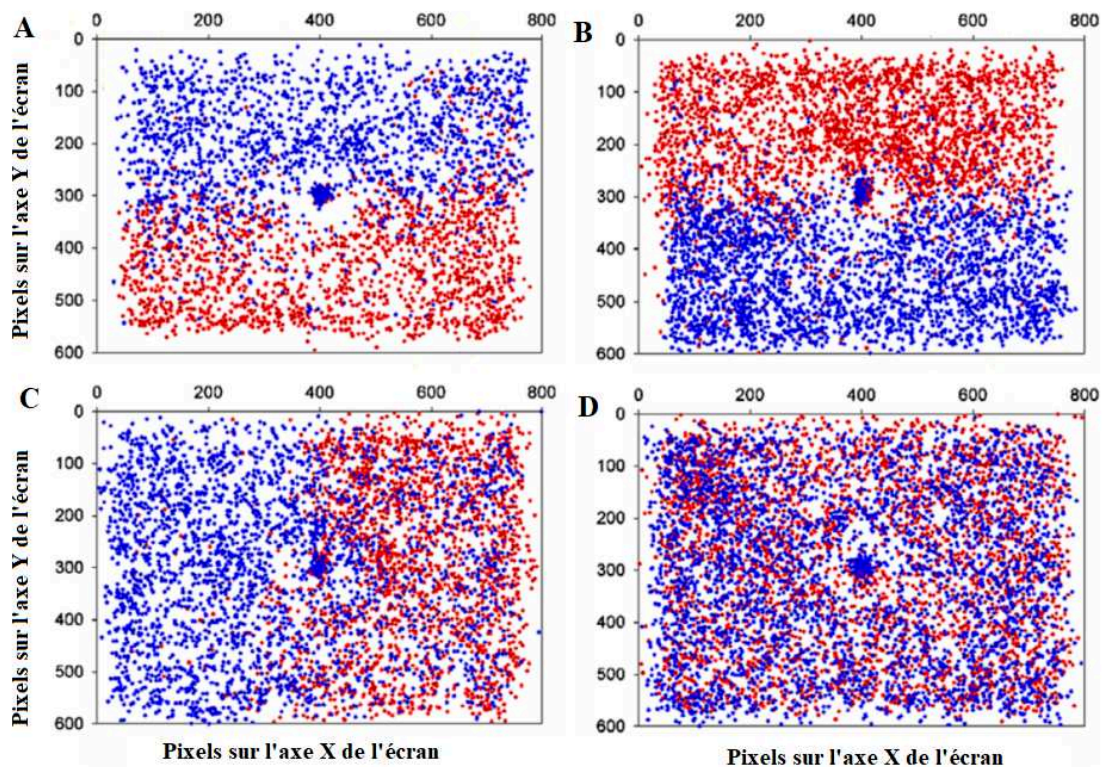


FIGURE 15 – Distribution du regard durant la tâche de recherche de cibles d'une dyade chez Brennan et al. (2008), dans des conditions de : A. communication orale uniquement, B. regard partagé + regard partagé, C. communication orale uniquement, et D. aucune information partagée. Les fixations d'un participant sont affichées en rouge, celles de l'autre participant en bleu. D'après [Brennan2008].

1.3 Méthodologies et solutions technologiques pour l'analyse de prise de décision, de coordination et/ou d'interaction

Pour étudier les situations de perception de l'environnement et d'interaction, les méthodes d'analyse ont profondément progressé au cours des dernières années. Ainsi, depuis les travaux initiaux de Thiffault (via la méthode des diapositives



FIGURE 16 – Exemples de situations d'interférence entre partenaires : A. dans une réception de balle en baseball, et B. lors d'une réception de balle en volley-ball.

[Thiffault1974, Thiffault1980]) ou Gibson (via la méthode de projection d'ombres pour la perception de distances [Gibson1979]), on a vu se développer des outils d'analyse notamment à partir de vidéos, ou plus récemment de réalité virtuelle (RV). Actuellement, avec l'amélioration rapide des puissances de calcul des ordinateurs et de la qualité des systèmes de RV, celle-ci commence à s'imposer comme un outil privilégié d'analyse [Pan2018], qui permet de proposer des situations standardisées et proches de situations réelles. Cette section s'attachera ici à présenter brièvement quelques travaux réalisés à partir de ces outils, et en particulier les intérêts de la RV pour l'analyse des situations de coordination et d'interaction, comme une tâche d'interception collective de balle.

1.3.1 Méthodes traditionnelles : l'exemple de la vidéo

Différentes approches techniques ont été traditionnellement utilisés pour l'analyse de la prise de décision (images, vidéos, questionnaires, etc.), et parmi eux, les outils vidéos ont longtemps été des éléments privilégiés. Ils reposent en général sur la mise en situation de participants regardant un ou plusieurs clips vidéos, afin de juger la situation présentée et/ou de prendre une décision. Dès lors, l'analyse de la performance s'appuie souvent sur une comparaison avec la prise de décision de sujets experts (*e.g.* [Lorains2009, Müller2006, Starkes1994, Vaeyens2007]). Cette utilisation de la vidéo

permet de moduler différentes facettes d'une scène dynamique, par exemple pour analyser l'impact d'un point de vue (voir par exemple [Cañal-Bruland2010]) ou d'un instant/indice visuel particulier (voir par exemple [Williams1999, Jackson2006]) sur la performance des participants. En effet, c'est un système d'analyse simple, peu onéreux et facile à mettre en place. Dans l'exemple spécifique du domaine sportif, il permet également de faire participer des joueurs blessés, et ne nécessite pas forcément la présence des entraîneurs lors des sessions d'évaluation ou d'entraînement [Lorains2013] : en ce sens, elle peut facilement être intégrée à la routine d'entraînement de joueurs ou d'équipes, sans sollicitation physique particulière.

Cependant, malgré ces avantages, plusieurs limites de ce type de méthodologie d'analyse ont été mises en avant. Tout d'abord, le choix des séquences présentées en vidéo peut être compliqué, car la difficulté des situations doit être considérée, afin de présenter des contraintes adaptées aux participants et aux objectifs. Ceci implique aussi l'utilisation de séquences vidéos capturées depuis un point de vue spécifique, pas forcément représentatif de la réalité de la situation d'interaction. De plus, et comme souligné par plusieurs travaux, ce type de situations rend difficile un engagement total du participant afin que les jugements/décisions soient les mêmes durant les expériences que lors de situations réelles : en effet, la tâche elle-même n'est pas indicative d'une performance réelle [Araujo2006, Farrow2003, Lorains2013]. Son caractère restreint et contraint (*i.e.* le fait que les comportements mis en œuvre dans ce type de tâche ne sont pas des comportements réels) rend difficile l'interprétation des réponses (jugement, clic-bouton, etc.), car elles ne sont pas nécessairement représentatives de situations issues du monde réel [Araujo2006, Farrow2003]. En effet, la tâche réalisée s'éloignant de la tâche réelle (*e.g.* cliquer sur un écran pour indiquer la direction finale d'une balle *vs.* intercepter réellement la balle), il est difficile d'exploiter ces performances vis-à-vis d'un contexte plus écologique, les deux tâches (*i.e.* tâche réelle et tâche de laboratoire) étant *in fine* deux tâches différentes. Tandis que l'application des techniques de vidéo a montré un intérêt dans la compréhension et le développement de la perception visuelle [Lynch2018], le caractère découplé de la perception et de l'action peut alors mener à des résultats atténués [Mann2007] voire biaisés [Dicks2010b]. Or, comme suggéré précédemment (voir partie 1.1.1.3), il apparaît important pour l'étude de ce type de situations de demander aux participants non seulement de décider d'une réponse ou d'une action, mais aussi de mettre en œuvre le mouvement réel correspondant, ce que les techniques vidéos ne permettent pas, ou difficilement. Ceci est d'autant plus vrai dans les situations de collaboration ou d'interaction, où la réalité de la situation implique souvent des relations complexes de perception-action entre les participants (et l'environnement),

et des adaptations *online* des comportements des individus face à l'évolution du stimulus. Une autre limite repose sur la vue monoscopique dans les études face à des écrans vidéo. En effet, il a été suggéré que les systèmes stéréoscopiques pouvaient mener à des représentations spatiales égocentrées (*i.e.* centrée sur l'individu), tandis que les systèmes monoscopiques mèneraient à des représentations allocentrées (*i.e.* centrées sur le monde environnant) [Kober2012]. De plus, bien que les indices visuels monoculaires (*e.g.* occultation, taille relative) peuvent contribuer à la perception de la distance [Cutting1997, Hillis2004], de tels indices fournissent généralement peu d'informations de profondeur [Kim2016]. La vue stéréoscopique (aussi appelée vision binoculaire), en revanche, maximise le nombre et la nature des indices visuels disponibles et perçus, et augmente la *présence* (*i.e.*, le sentiment "d'être réellement présent dans l'environnement virtuel" [Barfield1995, Sanchez-Vives2005], voir plus loin) des participants [Howard2012, Craig2013]. Par exemple, Hale et al. (2006) ont montré que des participants avec une faible acuité visuelle stéréoscopique pouvaient expérimenter une *présence* comparable à celle d'individus ayant une acuité visuelle stéréoscopique normale, et sans effet délétère, lorsqu'ils étaient confrontés à des système d'affichage stéréoscopique [Hale2006]. Enfin, dans les situations basées sur la vidéo, l'absence de point de vue adaptatif peut contribuer à une moindre qualité de la perception d'individus [Savelsbergh2002, Williams1994a]. En d'autres termes, l'information disponible dans la vidéo souffre d'un manque de validité écologique, car le stimuli visuel ne représente pas correctement les modifications du flux optique disponible pour l'individu lorsqu'il peut se déplacer dans son environnement [Craig2011].

Ainsi, bien qu'offrant des intérêts certains et importants (simplicité, coût, etc.), l'utilisation de vidéo présente des limites, et en particulier une difficulté à maintenir le couplage perception-action, s'appuyant plus sur une analyse de "ce qu'on voit" plutôt que de "ce qu'on fait" [Fadde2019]. Les récents progrès technologiques ont amené avec eux l'utilisation de la RV comme outil de recherche, qui permet entre autres de répondre à des besoins d'immersion stéréoscopique, de reproductibilité et de standardisation des situations présentées. Elle semble alors une alternative intéressante et pertinente dans l'étude des situations d'interaction et de collaboration, où la complexité de la prise de décision nécessite une analyse fine et standardisée.

1.3.2 La Réalité Virtuelle - un outil pertinent pour la recherche scientifique

La réalité virtuelle, par ses aspects technologiques, conceptuels et applicatifs, recouvre de nombreuses définitions. S'appuyant sur les travaux précurseurs de Ivan

Sutherland dans les années 1960, qui a cherché à en définir les principes de bases [Sutherland1965] et créé un système doté d'un affichage stéréoscopique [Sutherland1968], elle a par la suite beaucoup évolué. Dans leur récent livre, Arnaldi et al. (2018) la présentent comme un "champ scientifique et technique qui utilise l'informatique et les interfaces comportementales afin de simuler, dans un monde virtuel, le comportement d'entités trois dimensions (3D) qui interagissent entre elles en temps réel, et avec un ou plusieurs utilisateurs immergés de manière pseudo-naturelle au travers de canaux sensorimoteurs" [Arnaldi2018]. Elle repose alors sur une technologie récente et en fort développement, qui permet de simuler, analyser ou entraîner des situations diverses dans lesquelles un ou plusieurs utilisateurs sont placés. Afin de permettre à l'utilisateur de réaliser la tâche tout en ayant l'impression de la réaliser dans le monde réel, il s'agit pour le système de "tromper le cerveau" en offrant des informations et des situations similaires à celles rencontrées dans la réalité. En ce sens, la RV est alors vue comme "la capacité offerte à un (ou plusieurs) individu(s) de mener une série de tâches réelles dans un environnement virtuel, cette simulation étant basée sur l'immersion de l'utilisateur dans l'environnement virtuel au moyen de feedbacks interactifs et d'une interaction directe avec le système" [Arnaldi2018]. Pour compléter cette approche simple, les auteurs apportent sur les termes majeurs les précisions suivantes :

- o **Tâches réelles.** En effet, bien que la tâche soit menée dans un environnement virtuel, elle est bien réelle. Par exemple, on peut commencer à apprendre à piloter un avion dans un simulateur (de la même manière que les vrais pilotes le font déjà) car on développera les compétences et capacités nécessaires lors du pilotage d'un véritable avion.
- o **Feedbacks.** C'est une information sensorielle (*e.g.* visuelle, auditive, haptique) que l'ordinateur synthétise en utilisant des modèles digitaux, c'est-à-dire des descriptions de la forme et apparence d'un objet, de l'intensité d'un son ou d'une force, et qui fournit à l'utilisateur des informations supplémentaires sur la tâche ou l'environnement.
- o **Feedbacks interactifs.** Ces opérations synthétiques résultent de calculs relativement complexes de logiciels, et prennent dès lors un certain temps pour être réalisées. Si la durée de calcul et d'exécution est trop longue, alors le cerveau percevra l'apparition d'une image fixe, puis d'une autre, détruisant tout sens de continuité visuelle, et avec elle, de mouvement. Plus encore que l'apparition d'une image fixe, le décalage de la réponse suite à l'action de l'utilisateur (*i.e.* apparition d'une forte latence) viendra perturber cette continuité. Il est alors essentiel que le feedback soit interactif -et à latence imperceptible- pour

obtenir une bonne sensation d'immersion.

- o **Interaction.** Ce terme désigne les fonctionnalités offertes à l'utilisateur pour agir sur le comportement du système, en se déplaçant, en manipulant et/ou déplaçant des objets dans l'environnement virtuel ; et de manière symétrique, l'information qui est ensuite délivrée par l'environnement à l'utilisateur, qu'elle soit visuelle, auditive ou haptique. Les auteurs insistent particulièrement sur ce point, en précisant que si aucune interaction n'est possible, alors l'expérience ne peut pas être appelée réalité virtuelle.

D'un point de vue technologique, la RV repose majoritairement sur l'utilisation de casques de réalité virtuelle (appelés Head-Mounted Displays, HMD) et les salles immersives (appelés Computer-Assisted Virtual Environments, CAVE, originellement développée en 1992 à l'Université de l'Illinois [Cruz-Neira1992], et généralement constituée de 4 murs), où l'utilisateur est plongé dans un monde virtuel (voir Figure 17). L'immersion dans l'environnement s'appuie sur trois éléments principaux : 1) l'affichage stéréoscopique, 2) la vision complète, c'est-à-dire que le monde extérieur est exclu de la vision du participant, même lorsqu'il tourne la tête, et 3) le contrôle dynamique du point de vue, par le suivi des mouvements de la tête du participant, et l'adaptation du point de vue en conséquence [Brooks1999, Pan2018, Slater2009].

La réalité virtuelle constitue donc un outil écologiquement plus fiable que la vidéo pour simuler des situations réalistes, et permet en plus de proposer un cadre qui peut être manipulé et contrôlé avec précision. Avec l'exemple de l'interception de balle, [Craig2011] souligne que des facteurs multiples (comme la vitesse, la direction ou encore la durée de vol de la balle) peuvent être plus facilement contrôlés, adaptés en RV, afin de produire des séquences reproductibles [Tarr2002]. C'est en ce sens que l'auteur met en avant l'intérêt particulier de la RV : la possibilité de reproduire des situations à l'identique. En effet, dans une situation réelle, comme l'interception d'une balle par exemple, la trajectoire de la balle, sa vitesse, sa position de départ ne seront jamais reproduites à l'identique entre deux essais [Bray2003], et ce manque de reproductibilité peut rendre les observations faites difficiles à interpréter. En ce sens, la RV permet donc de présenter des conditions très standardisées, et d'utiliser un cadre de reproductibilité que les situations réelles ne peuvent pas offrir. De plus, la RV permet un contrôle total de l'environnement virtuel et de ses paramètres [Bideau2004], ce qui offre aux expérimentateurs des conditions quasi-infinies d'analyse. Comme vu précédemment, la présence d'affichage stéréoscopique dans les systèmes de réalité virtuelle est un avantage important pour la prise d'information par le participant, car elle permet de limiter les problèmes d'estimation de la profondeur d'un objet, ou de réalisation correcte d'une tâche d'interception [Mazyn2004]. Enfin, elle offre

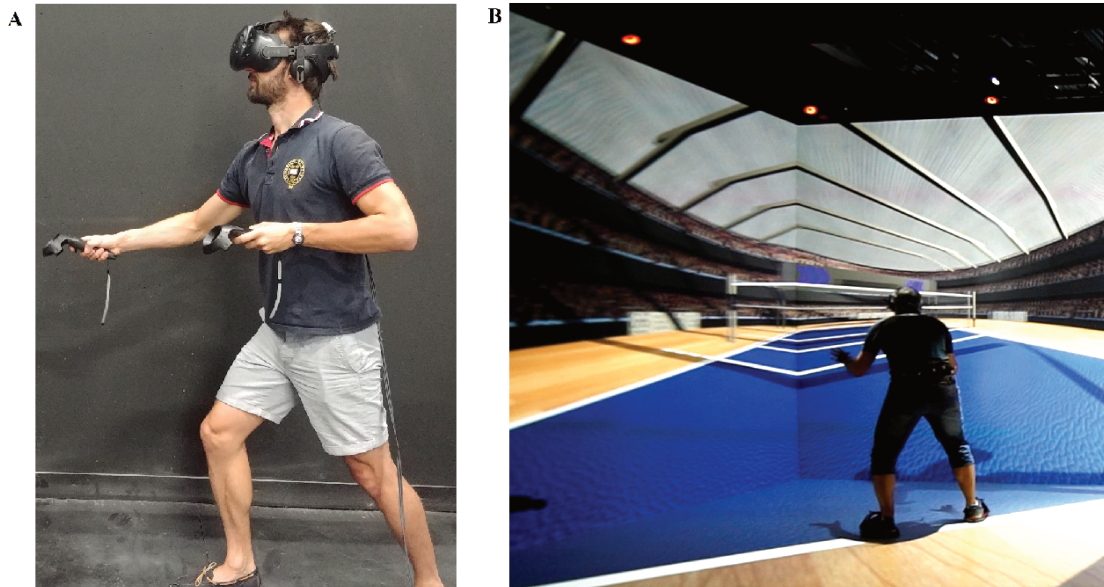


FIGURE 17 – Deux exemples de systèmes de technologie immersive : A. avec un sujet portant un casque de réalité virtuelle, et B. avec une sujet plongé dans une salle immersive. La salle immersive, bien que plus onéreuse et complexe à mettre en place, possède l'avantage de permettre un mouvement totalement libre du participant, la possibilité de voir son propre corps, ainsi que des résolutions graphiques et niveaux de détails supérieurs aux casques de RV [Grehl2015].

la possibilité d'avoir un point de vue adaptatif et une vision égocentrique, reconnus comme pouvant influencer la prise de décision (*e.g.* [Helsen1999, Petit2008]). Or, Cañal-Bruland et al. (2010) ont montré l'importance du point de vue pour mieux percevoir une situation impliquant d'autres personnes : des gardiens de handball devaient identifier si la situation qu'ils observaient (un joueur tirant un penalty en handball) était une feinte de tir ou un tir réel, et ont présenté de meilleurs résultats lorsqu'ils étaient placés à la première personne (gardien) comparé à une vue de côté, à la troisième personne (spectateur) [Cañal-Bruland2010]. Cependant, d'autres travaux n'ont pas trouvé de différences dans la performance globale de participant placés dans une vue à la première personne et à la troisième personne (voir par exemple [Covaci2015] dans une tâche de lancer-franc en basket-ball). Il est possible que la nature de la tâche (interception *vs.* lancer) puissent être à l'origine de ces différentes observations. En effet, l'action d'intercepter une balle implique la possibilité de réguler son action de manière continue, en fonction des informations disponibles à tout instant (trajectoires de balles, environnement, etc.), ce qui n'est pas possible dans une tâche de lancer où la performance est déterminée lorsque le lancer est effectué. Dès lors, il apparaît essentiel de prendre en compte cet élément lors de la mise en place d'une situation, en réalité virtuelle.

Afin que les environnements virtuels et les technologies immersives soient en mesure de reproduire efficacement les situations réelles, il est important que le participant se comporte et agisse de manière similaire dans la situation réelle et la situation virtuelle : cela se rapporte à son niveau de *présence*. La *présence*, que Barfield et Weghorst (1993) ont défini comme "un état subjectif et hypothétique de conscience et d'implication dans un environnement non-présent" ([Barfield1993], cités par [Brault2011]), est souvent abordée comme le sentiment pour le participant d'être "réellement présent dans l'environnement virtuel" (voir par exemple [Barfield1995, Sanchez-Vives2005, Slater1996]). Cependant, le niveau de *présence* du participant dépend de nombreux facteurs, comme la qualité graphique de l'environnement, l'outil de RV utilisé, ou encore le degré d'interaction possible avec l'environnement [Bideau2010]. En ce sens, l'affichage stéréoscopique et le point de vue adaptatif sont des éléments importants dans la mise en place d'une situation à haut niveau de *présence*, car sous ces conditions, les images fournies à l'observateur offrent une représentation plus précise de ce à quoi aurait ressemblé la situation dans un contexte réel, en intégrant des informations supplémentaires comme par exemple le parallaxe de mouvement, qui manque cruellement dans l'utilisation de la vidéo. À ce titre, plusieurs études se sont intéressées à l'évaluation de la *présence* en environnement virtuel. Parmi elles, Bideau et al. (2003, 2004) ont été les premiers à comparer le comportement d'un agent dans un environnement virtuel immersif avec une situation réelle [Bideau2003, Bideau2004]. Ils ont montré que les réponses motrices de gardiens de but de handball étaient similaires lorsqu'ils faisaient face à un tireur réel ou virtuel. La RV semble donc offrir alors des outils pertinents pour l'analyse de situations de prise de décision et/ou de coopération/coordination.

Plusieurs études ont montré l'intérêt de la RV pour explorer les situations d'interaction et/ou de prise de décision, en particulier dans des situations sportives. Bideau et al. (2010) ont par exemple mis en avant son importance par sa capacité à proposer des situations standardisées et contrôlables, tout en limitant les effets délétères de procédures à faible contexte écologique (haut degré de subjectivité, manque d'immersion dans la tâche, etc.) [Bideau2010]. Ces observations ont été corroborées par Vignais et al. (2015) qui ont montré que la performance réalisée par des gardiens lors d'une tâche d'interception de balle de handball était meilleure lorsqu'ils étaient immergé dans un environnement virtuel que lorsqu'ils faisaient face à une vidéo [Vignais2015] : les gardiens étaient plus efficaces, plus précis et commençaient leur mouvement d'interception plus tôt. Il a aussi été montré que la réalité virtuelle est un outil efficace pour entraîner des individus à la réalisation d'un geste particulier (voir par exemple [Miles2013, Miles2014] sur la passe en rugby), mais également

des coordinations interpersonnelles (voir par exemple [Varlet2013] dans une tâche de rameur en équipe).

Ces technologies immersives, cependant, doivent être utilisées avec précaution pour faire face aux contraintes techniques et méthodologiques parfois rencontrées. Un premier point technique concerne la latence, le délai entre le moment où l'action est réalisée et où sa conséquence s'affiche dans l'environnement virtuel, qui peut rendre l'expérience virtuelle difficile voire altérée. Cependant, durant les dernières années, les outils de RV ont fait de grands progrès, et les études récentes n'ont pas reporté de problème de latence dans leurs expérimentations. Un autre aspect est le "mal de la réalité virtuelle" (*i.e.* une sensation d'inconfort/nausée causée par les systèmes immersifs) que certains participants peuvent expérimenter, et qui semble très sujet-dépendante. Un élément primordial pour réduire cet effet délétère est l'adaptation à la technologie et à l'environnement (pour un travail complet sur les effets secondaires de la RV, voir [Barrett2004] or [Rebenitsch2016]). En effet, une exposition régulière à des environnements virtuels a été montrée comme bénéfique pour s'adapter à ses conditions, et réduire ses effets [Howarth2008, Keshavarz2016]. De plus, lorsque l'on plonge plus loin dans ce concept, il n'est pas clair que le mal de la réalité virtuelle pourrait ou non affecter les processus de perception, d'action ou d'apprentissage [Miles2012]. Enfin, les casques de RV, en plus de restreindre les mouvements physiques (poids de l'appareil, câbles, etc.), proposent des champs de vision limités : Fink et al. (2009) ont par exemple reporté que la mauvaise performance observée dans leur tâche d'interception de balle pouvait être due à un champ de vision trop restreint du système utilisé [Fink2009]. Toutefois, d'autres protocoles ont utilisé des outils similaires, ou des champs de vision limités, et n'ont pas constaté d'effet sur la performance [Fajen2011, Brault2012, Covaci2015] : il est possible que cela soit dû au fait que, dans ces études, les participants devaient se focaliser sur un élément particulier de la scène, et n'avaient donc besoin d'avoir qu'un champ de vision restreint. De plus, les nouvelles générations de casques de RV proposent des champs de vision horizontaux allant jusqu'à 200°, ce qui est même supérieur au champ de vision humain [Heilig1992, Mazuryk1996] : il semble ainsi que le champ de vision restreint parfois mis en avant dans certaines études ne soit plus aujourd'hui, dans la technologie comme dans les récentes études, une limite technique ou scientifique. Cependant, il est important de prendre en compte cet élément et les potentiels effets qu'il peut avoir sur l'expérimentation et/ou les résultats observés.

Au-delà des aspects techniques, il nous apparaît important de souligner les précautions qui peuvent être liées aux aspects méthodologiques. En premier lieu, la familiarisation avec l'environnement virtuel semble importante non seulement pour

réduire les potentiels effets négatifs de la RV (voir par exemple [Rousset2018]), mais aussi pour réaliser la tâche de manière plus efficace et précise. Covaci et al. (2015) ont en effet expliqué que, dans leur tâche de lancer franc en basket-ball, beaucoup de participants utilisaient la RV pour la première fois et ont signalé qu'il était difficile de s'entraîner en RV, un effet qui aurait pu être limité par une plus grande familiarisation avec la tâche [Covaci2015]. Ensuite, et comme noté précédemment, beaucoup d'études ont mis en avant l'importance de réaliser une tâche en RV qui soit le plus proche possible de la tâche réelle, afin de maximiser les possibilités de transfert de compétences/habiletés du virtuel vers le réel. Ceci implique aussi l'utilisation de feedbacks (visuels, haptiques, auditifs) afin d'offrir au participant les conditions optimales pour réaliser la tâche [Zaal2003, Covaci2015]. Dans leur tâche de lancer franc, Covaci et al. (2015) ont, par exemple, observé des comportements moteurs plus naturels lorsqu'un "guide visuel" (*i.e.* des anneaux placés dans l'environnement virtuel pour indiquer la trajectoire de balle idéale) était présent [Covaci2015]. Zaal et Michaels (2003), quant à eux, ont mis en avant le fait que, dans une tâche d'interception, la performance était meilleure lorsque les individus réalisaient l'interception avec la tête plutôt qu'avec la main, car en l'absence de feedback haptique en RV (*i.e.* absence de retour sensoriel sur la peau lorsque la balle est interceptée, à l'inverse d'une situation réelle), la vision offrait un feedback intéressant pour l'utilisateur, et avec lui, une meilleure performance lors de l'interception avec la tête [Zaal2003]. Les auteurs ont en particulier souligné le fait que, via l'expansion rétinienne lors de l'approche de la balle (voir partie 1.1.2.1), les participants ont pu mieux identifier la trajectoire de la balle, et agir en conséquence. Enfin, très peu d'études ont mis en situation plus d'un individu en réalité virtuelle, dans une tâche de collaboration/interaction, bien que les travaux déjà menés sur les expériences partagées en RV aient offert des résultats intéressants sur l'apprentissage de tâches de coordination interpersonnelle [Varlet2013] ou sur l'engagement dans la tâche [Fribourg2018]. Il semble donc important et intéressant de proposer des situations où les participants doivent interagir continuellement et maintenir des niveaux élevés de motivation et d'engagement, comme les situations d'interception de balle.

Dès lors, comme le soulignait Gibson (1979), percevoir est un processus actif [Gibson1979], et l'utilisation des technologies immersives permettent aux participants d'être actifs à la fois dans la perception des affordances, mais aussi la réalisation de l'action. Dans le cas spécifique de l'interception de balle, être en mesure de suivre la balle et choisir où chercher et prendre l'information visuelle est un élément essentiel [Craig2011], en comparaison des études réalisées via des vidéos, où le

point de vue est allocentré et l'affichage monoscopique. Comme le soulignait précocement Bruce Abernethy (1990), une progression du paradigme écologique dans la recherche apparaît important [[Abernethy1990a](#)], bien que le problème de la reproductibilité des études et conditions semble difficile dans les tâches réelles de perception et perception-action : comme nous venons de le voir, la RV semble alors un outil pertinent et adapté pour répondre à ce double problème.

2 Synthèse et objectifs

L'analyse de la littérature a montré des avancées récentes et significatives dans le domaine de la coordination à l'échelle d'un ou plusieurs individus. En particulier, les études se sont attachées à comprendre comment s'organise la réalisation d'une tâche dans des situations collaboratives, et ont cherché à identifier le poids des affordances dans la prise de décision pour l'action. De plus, la façon dont la coordination émerge de l'interaction entre les participants a été mise en avant, et apporte de premiers résultats fondateurs pour la compréhension globale du phénomène. Cependant, la plupart de ces études se sont intéressées à des tâches simples (*e.g.* [Schmidt1994, Richardson2008, van Ulzen2008]), décontextualisées (*e.g.* [Benerink2016, Benerink2018, van Opstal2018]), ou mettant en jeu une prise de décision limitée (*e.g.* [Ramenzoni2012, Varlet2013, Romero2015]). De plus, plusieurs études se sont intéressées à la compréhension de la collaboration entre deux (ou plusieurs) individus, mais très peu ont également cherché à comprendre comment l'interférence pouvait survenir entre eux, une situation pourtant fréquemment rencontrée notamment dans les sports collectifs. Niek H. Benerink (2017) propose un exemple intéressant de situation où la collaboration et la prise de décision (individuelle et collective) sont essentielles dans la réalisation de la tâche : la réception de service en beach volley-ball [Benerink2017]. Dans cette situation, deux individus doivent se préparer à réceptionner le service, bien qu'un seul des deux réalisera réellement l'interception. Sous une contrainte temporelle forte [Benerink2015], il s'agit alors pour les deux individus de tacitement décider qui interceptera le ballon et qui ne l'interceptera pas, tout en évitant de se gêner mutuellement pour assurer une coopération efficace. De manière plus large, les situations sportives dynamiques reposent sur des phénomènes complexes, émergeant à la confluence d'attributs et de contraintes propres à l'individu, à son environnement, et à la tâche accomplie [Newell1986]. Dans le cas des sports collectifs, cette complexité repose majoritairement sur les mouvements des coéquipiers, des adversaires et de la balle, mettant en jeu des contraintes temporelles importantes qui influencent la prise de décision à l'échelle d'un ou plusieurs individus, et avec elle, la réalisation de l'action. Ce type de décision et d'organisation interpersonnelle se retrouvent en effet dans de nombreux sports collectifs où une interception de balle est mise en jeu (*e.g.* rugby, football, handball, tennis en double, volley-ball), offrant un support d'analyse particulièrement pertinent dans l'étude des coopérations et

interférences entre deux ou plusieurs individus.

Dans le cas spécifique d'interception de balle, deux principales stratégies perceptivo-motrices sont couramment évoquées : prédictive ou prospective [Bastin2006]. Si les stratégies prédictives, issues de l'approche cognitive, abordent l'interception comme un calcul en amont de la position finale de l'objet (conditionnant la réussite dans la tâche [Regan2000]), elles permettent en revanche mal d'analyser l'interception lors de tâches plus complexes, car prennent difficilement en compte les régulations *on-line* des participants. De plus, si les études portant sur la coopération mettent en jeu des cadres d'analyses et des questions intéressantes, elles restent cependant éloignées de tâches collaboratives réelles, qu'elles soient issues de la vie quotidienne, de situations de travail, ou encore d'activités sportives. Or, comme abordé dans cette thèse et mis en avant par [Gibson1979], "Nous devons percevoir pour agir, mais nous devons également agir pour percevoir" : dans ce contexte, il est important de donner l'accent au couplage qui existe entre perception et action, et dès lors de proposer des situations permettant le maintien du cycle perception-action. À cette fin, il s'agit de s'appuyer sur des situations et approches méthodologiques qui : 1) offrent des solutions technologiques pertinentes pour la mise en place de situations collaboratives, 2) permettent un contrôle précis et standardisé des conditions d'analyse, et 3) offrent un cadre optimal pour le maintien du cycle perception-action, en permettant notamment aux individus d'être immergés dans la situation (point de vue égocentrique et dynamique, affichage stéréoscopique) et d'être impliqués physiquement dans la tâche (c'est-à-dire de ne pas s'appuyer uniquement sur une tâche de jugement).

Parmi l'ensemble des dispositifs disponibles pour créer ces conditions d'analyse, la réalité virtuelle est un outil de plus en plus populaire, en particulier dans l'analyse de situations sportives [Bideau2010]. Elle offre en effet une opportunité de modifier et standardiser les contraintes spatiales et temporelles de l'environnement, pour adapter et faire évoluer une situation d'analyse, et manipuler l'expérience immersive du participant (voir par exemple [Nahab2010, Jeunet2018]). Le ou les individus peuvent interagir avec l'environnement virtuel [McMenemy2007] tout en conservant un contexte écologique et un contrôle expérimental optimaux [Loomis1999], en se confrontant à des situations tirées de captures de mouvement réelles (*e.g.* [Brault2012]), et même en interagissant en temps réel avec d'autres individus (*e.g.* [Fribourg2018]). De plus, elle permet une adaptation continue du point de vue du participant, augmentant d'autant plus les sensations d'immersion et de réalisme de la tâche, en comparaison de systèmes 2D [Shim2006]. Ainsi, pour l'ensemble des atouts qu'elle offre, la réalité virtuelle semble être selon nous un outil pertinent et prometteur pour l'analyse de situations sportives (comme l'interception de balle),

dans un cadre théorique de perception-action.

Forts de ces constats, nous nous sommes intéressés à la manière dont deux individus s'organisent collectivement (*i.e.* se répartissent/divisent la tâche) pour réaliser une interception de balle. En particulier, nous avons cherché à savoir comment ils organisent tacitement cette interception, mais avons également exploré la manière dont une interférence peut apparaître entre eux. De plus, la question de cette interférence, son origine et les facteurs qui l'influencent, semblent être des éléments essentiels à prendre en compte lors d'analyses de situations sportives, et plus largement, de situations de la vie quotidiennes mettant en jeu des coordinations interpersonnelles. Les objectifs de cette thèse sont alors établis à plusieurs niveaux : 1) explorer dans la littérature l'utilisation de la réalité virtuelle comme support d'analyse de sports collectifs (ayant donné lieu à une publication dans la revue *Journal of Sports Sciences*, intitulée *Virtual reality to assess and train team ball sports performance : A scoping review*, et acceptée le 3 août 2019), 2) construire des outils collaboratifs en réalité virtuelle (HMD et CAVE) qui permettent l'analyse en temps réel de situations d'interactions multiples dans un contexte standardisé et écologique, 3) explorer la façon dont deux individus organisent tacitement leurs actions pour atteindre un but commun (*i.e.* l'interception d'une balle), c'est-à-dire la façon dont ils décident qui doit intercepter la balle et qui doit s'effacer pour laisser agir son partenaire, et 4) étudier l'apparition d'une interférence entre eux, et l'influence des conditions de réalisation de la tâche sur cette interférence.

Ainsi, nous présenterons tout d'abord un chapitre autour des contributions techniques et technologiques de cette thèse, c'est-à-dire la façon dont nous avons construit les outils informatiques qui permettent à des individus d'interagir en réalité virtuelle, en temps réel. En particulier, nous expliquerons (brièvement) la manière dont nous avons construit une architecture de communication de système pour permettre à plusieurs individus réels d'interagir dans un même environnement virtuel. Nous expliquerons ensuite le fonctionnement des surcouches technologiques utilisées dans cette thèse (casques de réalité virtuelle HTC Vive, salle immersive type CAVE), et la façon dont la communication entre les individus est ajustée selon le système utilisé. Dans un second temps, nous présenterons la façon dont deux individus coordonnent leurs actions pour intercepter collectivement une balle, dans une situation où ils sont placés face-à-face. Nous chercherons en particulier à identifier le poids de la complexité de la tâche (informations visuelles disponibles, incertitudes sur les mouvements du partenaire, etc.) dans l'apparition et l'évolution d'une interférence entre les participants. Enfin, dans le dernier temps de cette thèse, nous explorerons l'interception de balle réalisée par deux individus situés côte-à-côte. De plus, nous

chercherons à étudier si la façon dont l'interception est réalisée (avec la tête, avec les mains) influence l'interférence entre les participants. La particularité de cette thèse repose notamment sur la dynamique de mouvement des participants dans les tâches proposées, des situations encore -à notre connaissance- inexplorées dans une tâche collective d'interception, et qui permettent le maintien d'un contexte écologique optimal, tout en offrant des conditions standardisées, contrôlées, et reproductibles.

3 Plateforme expérimentale - Interagir en réalité virtuelle

Pour mener à bien cette problématique autour de l'interaction entre plusieurs individus en réalité virtuelle, il est nécessaire de mettre en place des environnements virtuels dits "collaboratifs". On appelle environnement virtuel collaboratif un environnement virtuel qui met en jeu des interactions entre plusieurs utilisateurs pour leur permettre de réaliser ensemble des tâches communes. Dans cet objectif, il a donc été nécessaire de construire les outils technologiques qui permettent de répondre à notre questionnement scientifique sur les interactions. La première partie de cette thèse a donc porté sur la conception et la réalisation de cet outil dédié aux interactions de plusieurs utilisateurs en réalité virtuelle. En effet, si quelques travaux récents se sont déjà intéressés à l'interaction entre plusieurs individus, nous avons dû faire face à l'absence d'outils disponibles permettant l'interaction en temps réel de plusieurs participants dans un même monde de réalité virtuelle. Ce chapitre décrit synthétiquement les concepts mis en place pour cette communication multi-participant ainsi que l'architecture logicielle développée pour permettre les études perceptivo-motrices réalisées dans cette thèse. Ce développement de la plateforme expérimentale a demandé un investissement en temps de plusieurs mois et a abouti à une librairie complète de fonctions C#. Nous souhaiterions rendre prochainement ces informations publiques et transparentes, de même que le code utilisé pour les mettre en place, non seulement pour les besoins de cette thèse, mais aussi pour offrir au champ des STAPS -et des autres disciplines- l'opportunité de les utiliser.

3.1 Environnement virtuel collaboratif

La RV permet d'immerger et de mettre en interaction des participants avec un environnement virtuel, un monde en 3D créé numériquement qui contiennent des représentations graphiques variées simples ou complexes [Churchill1998]. Afin que l'environnement virtuel soit en plus collaboratif, il est nécessaire que les participants ne soient plus seuls face à leur monde virtuel mais puissent partager un même monde virtuel. En effet, les participants impliqués utilisent chacun un dispositif d'immersion (casque ou salle immersive) et des périphériques d'entrée pour pouvoir agir sur le monde virtuel. Lors de la collaboration en réalité virtuelle, il est donc nécessaire de

rendre le monde virtuel cohérent et partagé alors que les participants restent équipés de leurs propres dispositifs matériels, et ne sont donc pas (nécessairement) ensemble physiquement. Il faut noter qu'il existe des salles immersives permettant directement de partager le même espace physique avec une visualisation du monde virtuel partagée sur les écrans de la même salle. Mais cette solution est très coûteuse et rare, et nous n'avons pas accès à un tel dispositif. Notre objectif est donc de permettre à des participants qui sont dans des espaces physiques distincts et chacun équipé de leur propre dispositif matériel de collaborer dans un unique monde virtuel comme cela a été fait récemment dans l'étude de Fribourg et al. (Figure 18) [Fribourg2018].



FIGURE 18 – Exemple d'interaction entre deux participants dans un environnement virtuel collaboratif. D'après [Fribourg2018].

Afin de réaliser cette plateforme logicielle expérimentale, il est nécessaire de relever plusieurs défis techniques importants identifiés dans les travaux de [Benford2001], [Joslin2004] ou encore [Chen2015] :

- o **Gestion de la scène.** Concaténer les événements et maintenir une certaine consistance entre eux, segmenter un monde virtuel en plusieurs sections. Il s'agit en effet de mettre en place un monde cohérent pour tous les utilisateurs, où les événements qui surviennent sont parfaitement synchronisés et distribués pour l'ensemble des participants.
- o **Topologie du réseau.** Choisir entre une communication réseau client-serveur, pair-à-pair (en anglais "peer-to-peer", souvent noté P2P), ou hybride, pour limiter le trafic réseau et augmenter l'efficacité de distribution des données.
- o **Compression.** Compresser les données pour les transférer efficacement, en prenant en compte le grand poids des données générées par une interaction "en temps réel" entre plusieurs utilisateurs.

- o **Interface homme-machine et comportement de l'individu.** La réalité virtuelle, comme vu précédemment (voir 1.3.2), permet d'offrir de nombreuses informations (visuelles, haptiques, etc.) et des interactions sociales proches de la réalité.
- o **Présence des participants.** Offrir aux participants une immersion suffisante dans la tâche, pour qu'ils pensent agir (et agissent effectivement) comme dans une situation réelle.
- o **Point de vue de l'utilisateur.** La réalité virtuelle permet de placer l'individu dans différents points de vue du monde partagé, en fonction de la situation étudiée.

Une part de ces défis techniques fait partie de toute application de réalité virtuelle, comme la diminution de la latence et l'adaptation du point de vue de l'utilisateur. En ce qui nous concerne, la difficulté porte principalement sur le premier point : assurer la pertinence et la cohérence du monde virtuel partagé par les participants alors qu'ils agissent tous sur ce monde virtuel chacun dans leur dispositif matériel. Cela signifie que chaque ordinateur gère les actions de chaque utilisateur indépendamment et modifie le monde virtuel en fonction. Il a donc été nécessaire de créer un système de communication des actions et des modifications des mondes virtuels de chaque participant afin de transmettre ces actions pour s'assurer que le monde partagé soit cohérent, que le monde perçu par chaque utilisateur soit le même et contienne les modifications apportées par les autres en temps réel. La figure 19 montre l'architecture mise en place pour permettre la création d'un monde virtuel collaboratif. Le cœur de cette plateforme est donc la couche de communication entre les systèmes décrite à la section 3.2.

En plus de la couche de communication, il a été nécessaire de gérer les modalités d'interaction qui sont différentes en fonction du matériel utilisé. En effet, la réalité virtuelle s'appuie principalement sur deux types de dispositifs : les casques de réalité virtuelle (Figure 20.A) et les salles immersives (Figure 20.B). Ils possèdent des types particuliers d'entrées nécessitant des traitements différents des données. La section 3.3 explicite les couches spécifiques qui ont été mises en place pour les deux études de cette thèse, chacune utilisant un type de système.

Tous ces développements ont été réalisés en C# et mis en place dans un moteur de jeu multiplateforme développé par Unity Technologies : Unity3D. Il offre une gestion intégrée des images, du son, de la physique ainsi que la possibilité de modifier les paramètres des simulations en cours d'exécution ce qui permet un débogage facilité des applications. De plus, les applications compilées sont compatibles avec de très nombreuses plateformes (Windows, Linux, iOS, Android, etc.).

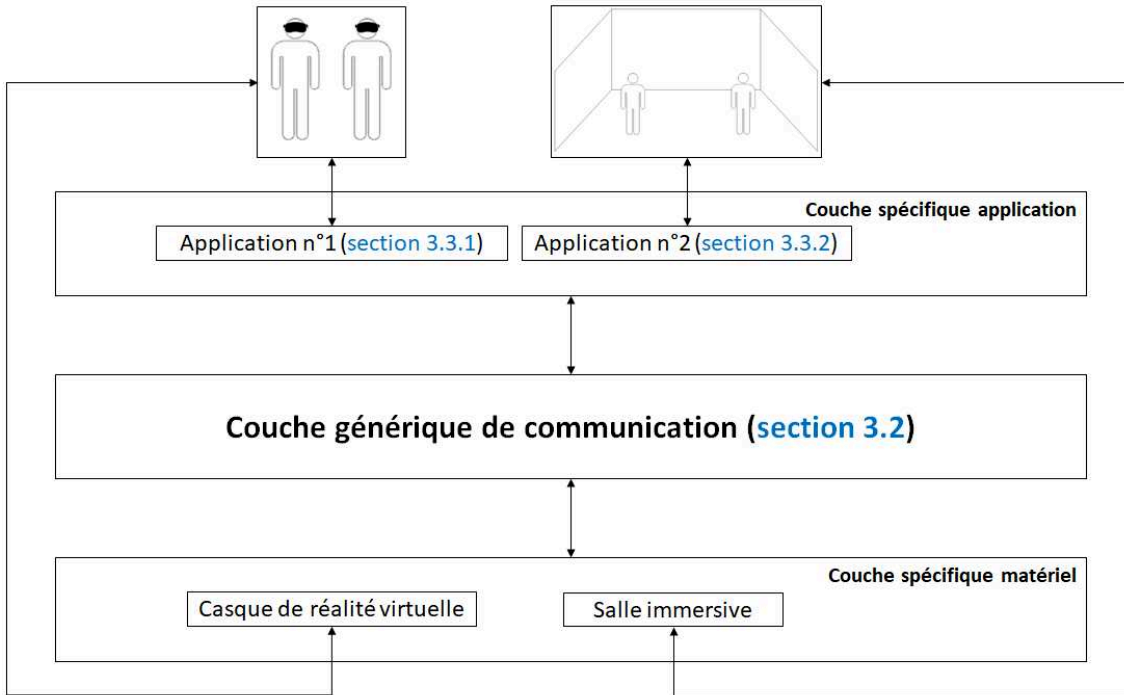


FIGURE 19 – Architecture logicielle mise en place pour permettre la synchronisation des actions des participants et la création d'un monde virtuel collaboratif unique et partagé par tous.

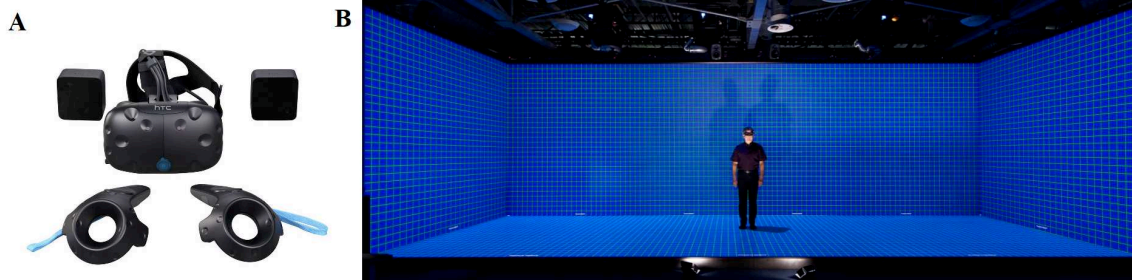


FIGURE 20 – Représentation des deux systèmes de réalité virtuelle utilisés dans cette thèse : A. un casque de réalité virtuelle de type HTC Vive (champ de vision = 110° , résolution graphique = 2160×1200 pixels) ; et B. une salle immersive de type CAVE (salle Immersia de Rennes, dimensions (L*l*h) = $9,6 \times 2,88 \times 3,1$ m, résolution graphique = 1920×1200 pixels).

3.2 Architecture générique de communication

Afin d'assurer la cohérence des mondes virtuels dans lesquels chaque participant est immergé, une structuration en modèle client-serveur est utilisée (cf. Figure 21). Chaque participant est ainsi associé à un client qui contrôle ses actions et ses retours d'informations. Ces clients sont en communication avec un serveur unique qui maintient une scène cohérente avec les actions de tous les utilisateurs. Cette struc-

turation permet d'ailleurs de faire des expérimentations sur le même site physique via une communication filaire directe entre les ordinateurs, ou sur des sites distants via une communication réseau avec le protocole TCP/IP ("Transmission Control Protocol/Internet Protocol").

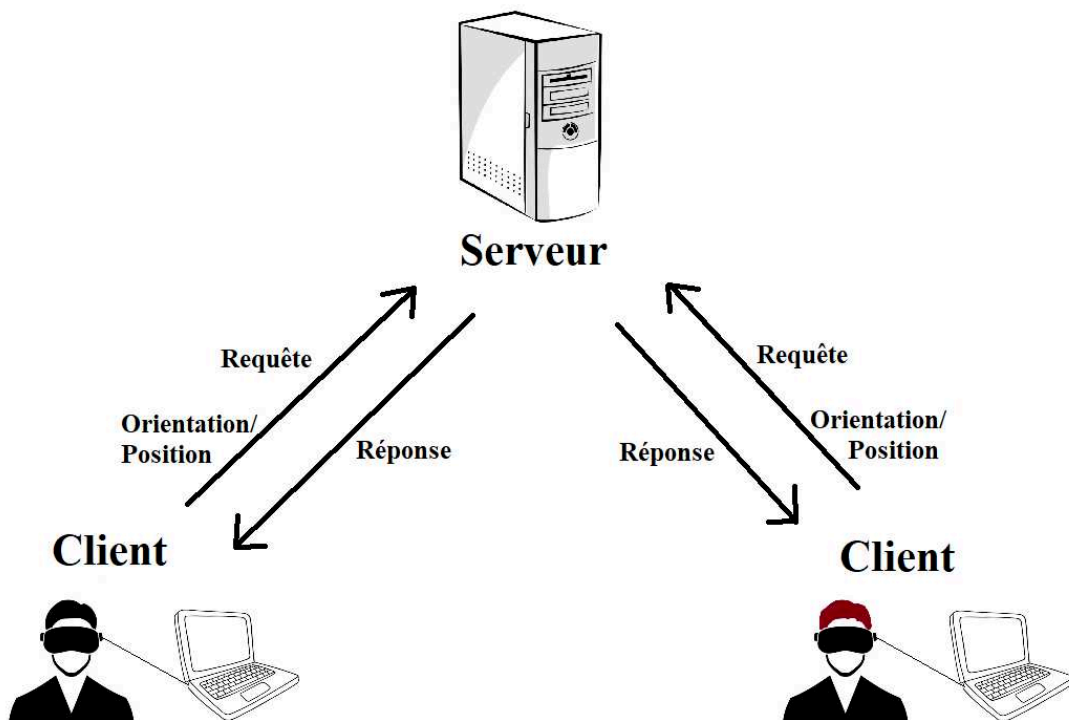


FIGURE 21 – Principe simplifié de fonctionnement du modèle client-serveur utilisé dans cette thèse : le client fournit des informations sur son état, et envoie des requêtes au serveur. En retour, le serveur envoie une réponse sur l'état global du système et des autres clients, à tout instant.

Les points de vue et les facteurs de la caméra virtuelle (focale, zoom, filtre graphique, etc.) sont gérés en local pour les clients ; mais le reste, c'est-à-dire la scène et ce qui la compose (avatars, objets, etc.), est géré par le serveur. Ainsi les actions sont transmises au serveur (par exemple geste de la main des participants pour arrêter une balle), qui en déduit l'impact sur les objets et envoie l'information aux clients. Chacun sait par exemple que l'avatar du participant 1 a touché la balle et que la trajectoire de celle-ci a été modifiée de telle manière. Pour avoir une efficacité optimale, les positions/orientations, etc. des objets ne sont pas toutes transmises à chaque pas de temps. Ainsi les simulations tournent en parallèle sur chaque client et seules les informations qui sont modifiées par un participant sont transmises. Par exemple, une fois la balle lancée, si personne ne la touche, la simulation physique qui calcule sa trajectoire à chaque instant est laissée calculée en local ce qui n'entraîne pas de latence due à leur transmission via le réseau. Il a donc été mis en place un

mécanisme de partage de contrôle de la simulation. Par défaut, les clients gèrent les objets en local et ne transmettent que les informations du participant au serveur. Chaque client indique ainsi au serveur qu'il est responsable d'un objet, et un système d'événements permet d'avertir d'un changement de statut, et donc ce qui doit être récupéré et utilisé sur les clients locaux. À chaque pas de temps, le serveur envoie donc les données pertinentes à tous les clients qui modifient ce qui doit l'être dans leurs propres simulations afin d'être cohérents les uns avec les autres.

Dès lors, tous les utilisateurs du réseau peuvent interagir directement entre eux, et "communiquer" au travers du réseau et de l'affichage des informations collectées et transmises par le serveur. Enfin, lorsque le serveur réalise des actions spécifiques (par exemple, lancer un nouvel essai ou une configuration différente), l'ensemble des clients du réseau a accès simultanément à cette information. Cela permet de gérer les aléas des expérimentations de manière cohérente et donc d'assurer une gestion automatique des sauvegardes des sessions.

Cette architecture permet ainsi la mise en place d'un environnement virtuel partagé et cohérent grâce à un système de communication générique. Il est à la base des travaux expérimentaux de ce doctorat. Cependant, l'interaction de chaque participant avec ce monde virtuel est différente suivant les périphériques d'entrées et de sorties, les systèmes matériels utilisés pour chaque participant. Il est donc nécessaire de proposer une couche de gestion spécifique aux applications en fonction des périphériques matériels utilisés.

3.3 Gestion spécifique des applications

Les systèmes matériels principalement utilisés en RV sont les casques et les salles immersives. Certaines caractéristiques sont similaires, telle que le monde virtuel qui peut être utilisé et présenté, ou encore la nécessité d'avoir l'information de position et d'orientation du point de vue du participant afin d'adapter la caméra virtuelle. De plus, lors de la collaboration entre deux systèmes de réalité virtuelle, il est dans les deux cas nécessaire de faire un recalage de la position et orientation relatives de ces espaces réels dans le monde virtuel partagé. Néanmoins, ces systèmes diffèrent dans l'interaction qu'ils proposent, aussi bien au niveau du retour perceptif du monde virtuel qui est fourni au participant qu'à celui des actions que ce dernier peut produire pour le modifier. Il est donc nécessaire de mettre en place une couche spécifique pour la gestion de ces deux types de système.

Or les deux études de ce doctorat s'appuient chacune sur un dispositif matériel différent. Cette section présente donc les spécificités des deux applications en termes d'interaction avec le système de RV et de visualisation de l'autre participant dans le

monde virtuel.

3.3.1 Étude 1 avec casque de réalité virtuelle

L'étude 1 est réalisée avec des casques de réalité virtuelle. Dans ce contexte, tout le champ de vision de l'utilisateur est couvert par le dispositif ce qui lui permet de percevoir le monde virtuel tout autour de lui à 360°, même s'il se retourne. Néanmoins, cela signifie qu'il ne peut pas voir son propre corps et notamment ses mains. L'interaction avec le monde virtuel se fait donc via l'utilisation de manettes dont les positions et orientations sont capturées en temps réel. Il est nécessaire de reconstruire un avatar du participant pour qu'il puisse avoir un retour sur ses propres mouvements. En effet, il a été montré que la *présence* des participants pouvait être accentuée par l'utilisation d'un avatar visualisé à la première personne, en vue subjective [Nowak2003]. Cependant, le nombre réduit de degrés de liberté fournis par ces manettes par rapport à ceux du corps complet même sur des personnages virtuels nécessite l'utilisation d'algorithmes de cinématique inverse. Ces derniers permettent en effet de retrouver les positions/orientations des segments à partir de ces contraintes de positions/orientations du casque et des manettes, mais deux problématiques se posent. La première est liée au grand nombre de degrés de liberté du corps comparé à celui contraint par les manettes. Le système est alors sous-contraint et il existe une infinité de solutions et donc de postures possibles. Néanmoins, lors de mouvements simples comme c'est le cas dans notre étude, les algorithmes de cinématique inverse permettent de choisir des configurations réalistes.

La seconde difficulté, plus problématique, concerne la cohérence des morphologies entre le participant et son avatar. En effet, si les dimensions des segments du corps et de l'avatar ne sont pas en adéquation, un mouvement virtuel pourrait ne pas correspondre au mouvement réel. Le coude par exemple ne sera pas bien placé si la longueur du bras n'est pas la même dans l'environnement virtuel et dans la réalité. Or dans le cas d'une représentation à la première personne, le sujet sera très sensible à ces artefacts de par la superposition de ces membres virtuels avec ses propres informations proprioceptives. Dans le cadre de notre première étude utilisant un casque de réalité virtuelle, nous avons donc fait le choix d'une représentation minimale afin de garantir une cohérence morphologique de l'avatar. La littérature scientifique a d'ailleurs mis en avant que le niveau de détails, jusqu'à un certain seuil, notamment une représentation en points, n'avait pas d'influence sur la perception du mouvement [Vignais2009, Vignais2010], et il a également été suggéré qu'une réduction du stimulus informationnel pouvait faciliter la perception d'un mouvement [Lintern1990, Farrow2013]. Nous avons donc fait le choix d'une représentation consti-

tuée de cylindres dont la longueur est automatiquement adaptée à la morphologie des sujets (voir Figure 22), à l'aide d'une position initiation de T-pose, une posture de référence en 'T'.



FIGURE 22 – Représentation de l'avatar utilisé lors de l'interaction à plusieurs individus avec les casques de réalité virtuelle HTC Vive. La position et l'orientation du casque déterminent la position et l'orientation de la tête de l'avatar, tandis que l'orientation et la position des mains de l'avatar sont déterminées par la position et l'orientation des manettes. Les membres supérieurs sont reconstruits par un script de cinématique inverse.

Afin d'optimiser la durée d'expérimentation (pas de besoin de mesurer les dimensions de tous les segments), et comme l'étude 1 porte sur la perception du déplacement global des trajectoires de balle et des participants, seul le haut du corps est représenté. Ce choix de représentation a également été réalisé en tenant compte du fait que le participant ne regarde ni son corps ni ses pieds lors de l'étude 1, et qu'il n'était donc pas nécessaire d'avoir une perception fine du bas du corps. De plus, cela permet de s'abstraire des indices visuels de comportement comme le regard ou l'expression faciale afin que les participants focalisent leur attention sur d'autres canaux d'indices comportementaux (*e.g.* orientation de la tête) [Roth2016].

3.3.2 Étude 2 en salle immersive

Pour l'étude 2 et afin d'avoir une plus grande liberté de mouvements des participants, nous avons fait le choix d'utiliser une salle immersive, couramment appelée CAVE, qui est constituée de plusieurs murs (généralement 4) utilisés comme écran et sur lesquels est projeté le monde virtuel avec le point de vue de l'utilisateur immergé. En l'occurrence, la salle Immersia de Rennes utilisée pour l'étude 2 est constituée de

4 murs et est équipée de 14 projecteurs Barco F90-4K13 pour des dimensions totales de $(L * l * h) = 9,6 * 2,88 * 3,1$ m (cf. Figures 20.B et 23). Le participant se trouve à l'intérieur de cette salle et est immergé dans le monde virtuel à l'aide de lunettes stéréoscopiques ressemblant à des lunettes de vue (modèle RF Volfoni EdgeVR). Le participant voit ainsi simultanément le monde et son propre corps au sein de cet environnement virtuel. L'interaction peut alors être réalisée directement avec ses propres membres, surtout qu'il est libre de se mouvoir dans tout l'espace, sans contrainte de fil par exemple. C'est la raison pour laquelle ces salles immersives sont généralement équipées d'un système de capture de mouvements qui fournit en temps réel la position et l'orientation des membres du participant.

Néanmoins, rares sont les salles immersives qui permettent d'immerger deux utilisateurs dans le même espace, puisque cela nécessite la capture du point de vue de chaque utilisateur et la projection sur les mêmes écrans partagés. Outre les coûts plus importants de la construction d'une telle salle immersive, cela implique de partager les ressources d'affichage des projecteurs pour afficher alternativement les points de vue de chaque utilisateur (lui-même décomposé en deux visions, celles des yeux gauche et droit) et donc de diminuer la fréquence de rafraîchissement. Dans notre cadre d'étude des interactions à deux individus, n'ayant pas accès à une telle salle, nous avons choisi de diviser notre salle immersive en deux, chaque participant en occupant une moitié et étant orienté vers un des coins afin d'avoir un champ de vision périphérique complet.

Afin de ne pas marquer de rupture entre la perception entière que le participant a de son corps et la visualisation de son coéquipier virtuel, nous avons fait le choix d'utiliser une représentation cohérente et donc complète du corps de l'avatar du partenaire. L'animation de ces avatars a été réalisée à partir de la capture de mouvements d'un ensemble de marqueurs réfléchissants (clusters) positionnés sur la tête (lunettes), les mains, les pieds et le bassin de chaque participant. Il était donc très facile de préparer ce dernier à l'expérimentation avec un temps d'équipement court. Un algorithme de cinématique inverse a ensuite été utilisé pour récupérer le mouvement complet du participant. Cependant, afin de limiter au maximum l'impact d'une différence de morphologie entre le participant réel et son avatar, nous avons mis en place une procédure d'adaptation morphologique de ce dernier. Les participants commençaient là encore l'expérimentation en T-pose (cf. Figure 24). La représentation de l'avatar était ainsi mise à l'échelle par rapport à la taille du sujet, et les différentes parties du corps (membres supérieurs, membres inférieurs, tronc) adaptées à sa réelle morphologie.

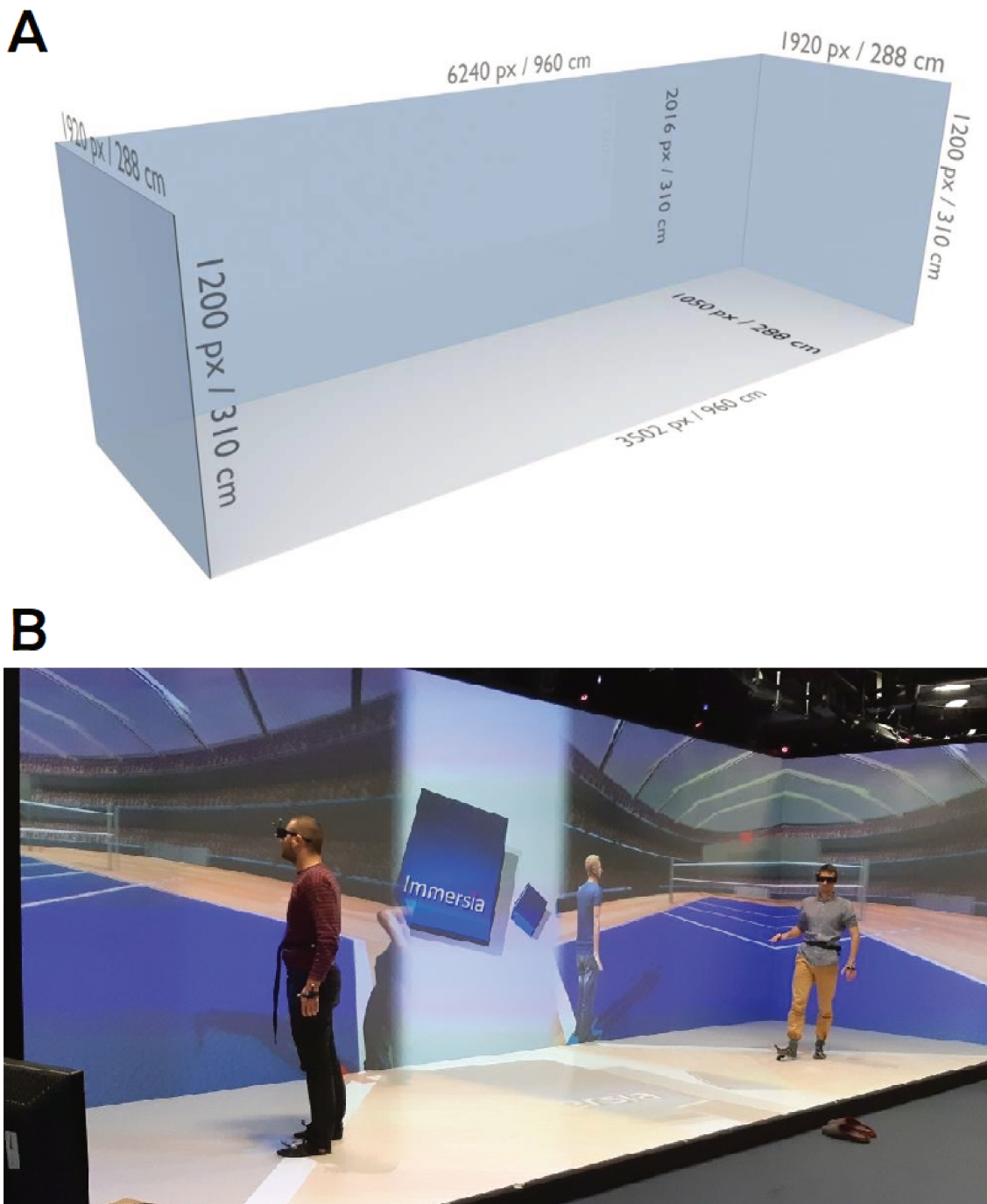


FIGURE 23 – A. Représentation schématique de la CAVE utilisée durant cette thèse (salle Immersia, Rennes) ainsi que de ses dimensions et résolutions graphiques. B. Photo réelle de la salle, avec deux utilisateurs.

3.4 Conclusion

Cette première étape du travail de thèse a donc eu pour but la mise en place de la plateforme collaborative en réalité virtuelle afin que plusieurs participants puissent



FIGURE 24 – Représentation graphique de l’avatar d’un participant, réalisant une T-pose utilisée lors de la calibration.

interagir dans le même environnement virtuel. Cette étape a demandé beaucoup de temps mais était fondamentale étant donné qu’il n’y avait aucune solution disponible pour réaliser nos projets. Elle sert ainsi de socle aux études de cette thèse sur l’analyse des interactions entre les participants dans une tâche d’interception de balle. De manière plus générale, ce travail servira également aux futures études sur l’utilisation de la RV pour l’étude de situations collaboratives. Cette plateforme logicielle possède plusieurs avantages et intérêts, en particulier pour la communauté scientifique, parmi lesquels :

- o Elle propose un cadre standardisé et contrôlé de pratique et d’analyse, afin de permettre aux expérimentateurs d’identifier les éléments précis et pertinents de la situation mise en œuvre. Ce faisant, elle permet de proposer des situations standardisées et reproductibles, ce qui n’est pas toujours possible dans des situations réelles.
- o Elle offre la possibilité de mettre en place des situations difficiles (voire impossibles) à mettre en place en réalité, comme nous l’avons par exemple fait dans cette thèse (interception par un partenaire virtuel fixe), mais qui pourraient prendre bien des aspects : grand nombre de joueurs impliqués, visualisation d’une situation selon différents points de vue (par exemple à la première per-

sonne mais aussi à la place de l'entraîneur ou encore d'un coéquipier dans le cadre d'analyse vidéo de matches en sports collectifs), etc.

- o Elle propose un cadre sécurisé d'analyse, en évitant par exemple les collisions réelles avec l'environnement ou les autres participants. À plus large échelle, elle pourrait être utilisée pour analyser l'interaction ou la collaboration entre des joueurs ne pouvant pas réaliser la tâche réelle, comme c'est le cas par exemple pour des joueurs blessés.
- o Elle offre la possibilité d'une interaction proche de celle mise en jeu dans des situations réelles. Se faisant, afin de maintenir la boucle perception-action de la situation proposée [[Craig2013](#), [Farrow2013](#)], elle permet par exemple d'avoir un affichage stéréoscopique de la situation, et d'être physiquement impliqué dans la tâche.
- o Elle s'appuie sur une architecture de communication générique qui peut ensuite être spécialisée par une surcouche casque de RV ou salle immersive, afin de proposer différents outils d'analyse de la situation.
- o Enfin, elle constitue en l'état un outil accessible pour la communauté scientifique, et pourrait être utilisée par des non-informaticiens sans qu'ils aient besoin de saisir précisément ou même de coder l'architecture du système, avec une prise en main minimale des outils. Couplée à la volonté que nous avons de la rendre publique et idéalement "clés en main", nous espérons qu'elle pourra être réutilisée et adaptée librement par d'autres membres de la communauté scientifique qui souhaiteraient travailler sur la collaboration/interaction entre plusieurs individus, en réalité virtuelle.

Ainsi, la première partie de cette thèse a été consacrée au développement des outils présentés ci-dessus. Les études qui suivent s'appuient sur cette architecture et ce développement informatique.

4 Coordinations interpersonnelles et interférence lors d'une tâche d'interception - le cas face-à-face

Ce chapitre s'attache à étudier la façon dont deux personnes coordonnent leurs actions pour réaliser une tâche commune d'interception de balle en face-à-face, en s'appuyant sur le paradigme développé par Niek H. Benerink. Ici, à travers l'utilisation de systèmes immersifs de réalité virtuelle, l'engagement physique des participants dans la tâche a pu être mis en jeu, une situation encore -à notre connaissance- inexplorée dans une tâche collective d'interception. Cette partie cherche donc à apporter une meilleure compréhension de mise en place de la coopération entre deux participants, mais aussi la façon dont l'interférence entre eux peut apparaître et évoluer.

Manuscript accepté pour publication.

Faure, C., Limballe, A., Sorel, A., Perrin, T., Bideau, B. and Kulpa, R. (2019) Dyadic interference leads to area of uncertainty during face-to-face cooperative interception task. *Frontiers in ICT - Virtual Environments*

4.1 Introduction

Dans la vie quotidienne, les gens interagissent souvent entre eux, parfois en combinant leurs efforts pour atteindre un but commun. Cependant, cette coopération n'est pas toujours correctement exécutée, car elle implique de devoir gérer de manière conjointe la réussite dans la tâche et les actions des autres. Les personnes qui interagissent doivent alors déterminer comment coordonner correctement leurs différentes actions pour être efficaces, sans interférer entre elles. Dans ce travail, nous nous sommes particulièrement intéressés à la façon dont l'interférence entre participants apparaît et mène à la création d'une zone d'incertitude, et comment elle altère la coordination entre participants. Cette étude a été réalisée dans un contexte d'interception collective de balles.

La coordination interpersonnelle dans des tâches d'action conjointe a été largement explorée dans la littérature, comme vu précédemment [Sofianidis2012, Vesper2014, Wing2014, Richardson2015, Rigoli2015, Mojtahedi2017, Eils2017]. De même, de nombreux travaux ont étudié l'interception d'un objet [Chardenon2005, Craig2006, Fajen2007, Warren2008, Craig2009, Ledouit2013] ou d'un joueur [Watson2011, Brault2012], mais très peu se sont focalisées sur l'interaction entre deux joueurs ou plus [Benerink2016]. Ces études ont donné des résultats particulièrement intéressants sur la façon dont deux participants coordonnent leurs actions pour réaliser la tâche ensemble, et de manière plus efficace que s'ils l'avaient réalisée seul. Cependant, ce n'est pas toujours le cas : en effet, il n'est pas rare d'observer des situations où les partenaires interfèrent entre eux, où ils se gênent, par exemple dans une situation sportive, lors d'une réception de chandelle en rugby, d'une réception de service en volley-ball, ou pour attraper une balle en base-ball/softball. Malgré l'importance de la coordination à l'échelle de l'équipe [Silva2013], dans certains cas, cette interférence résulte en une situation conflictuelle et en une interception manquée, ou même une collision entre les partenaires. Le but de cette étude est de se concentrer sur l'interférence qui émerge d'une situation conflictuelle, et comment cette interférence évolue en fonction des conditions de la situation. De plus, pour s'approcher de conditions réelles d'interception, nous avons souhaité que les sujets évoluent dans un environnement virtuel en 3D, avec un affichage stéréoscopique, et soient physiquement impliqués dans la tâche à réaliser. En effet, une coordination motrice importante, de même que des indices visuels plus complexes augmentent la difficulté de la tâche, et peuvent dès lors mener à des situations plus conflictuelles. Pour étudier des situations complexes tout en contrôlant les stimuli visuels présentés aux participants, nous avons basé notre étude sur un système de réalité virtuelle, qui permet de proposer des situations standardisées et contrôlables, tout en limitant les effets délétères de procédures

à faible contexte écologique (haut degré de subjectivité, manque d'immersion dans la tâche, etc.)[Bideau2010, Vignais2015].

Cette étude cherche donc à examiner la façon dont deux personnes interagissent et se gênent lors d'une tâche coopérative d'interception de balle, en évitant les collisions et en s'appuyant sur les indices visuels disponibles. Pour étudier cette coopération interpersonnelle, nous avons réalisé des expérimentations où les participants devaient intercepter physiquement des balles à l'aide d'une sorte de raquette, mobile sur un axe d'interception partagé afin qu'un seul des deux participants puisse réaliser l'interception. De la même manière que Benerink et al. (2016) ont observé dans leur étude [Benerink2016], nous nous attendons à voir les participants adopter un pattern stable et robuste de coopération dans la tâche d'interception. En particulier, nous souhaitons évaluer si l'organisation collective dépend de la trajectoire de balle et des informations disponibles sur le partenaire et/ou son action.

4.2 Matériel et méthodes

4.2.1 Participants

Vingt-quatre participants (16 hommes et 8 femmes), droitiers, âgés de $32,9 \pm 8,9$ ans (moyenne \pm écart-type) ont pris part à cette étude. La taille des participants était de $173,6 \pm 5,8$ cm. Aucun des participants n'était blessé au moment de l'étude, ni n'avait subi de blessure dans les 6 mois précédents l'étude, et chacun a donné son accord écrit et consenti pour prendre part à l'étude. Aucun d'entre eux n'a ressenti de malaise ou ne s'est blessé durant les expériences. L'étude a été menée dans le respect de la Déclaration d'Helsinki, et les sujets étaient informés de la possibilité de se retirer librement de l'étude à tout moment, sans aucune question ni conséquence, et aucun ne s'est retiré.

4.2.2 Setup expérimental

Les expériences ont été menées dans un grand gymnase, assez large pour éviter les collisions avec le monde réel. La figure 25 présente l'organisation des expériences et l'environnement virtuel utilisé, et la figure 26 un exemple d'essais réalisés par un participant dans chacune des conditions. L'environnement virtuel consistait en une salle longue de 6 mètres, large de 4 mètres, et haute de 4 mètres. L'environnement virtuel a été réalisé via le logiciel Unity 3D (version 5.6.6). L'origine de la scène a été placée au centre de la scène.

Pour interagir avec le monde virtuel, les participants ont utilisé leur main dominante (tous les participants étaient droitiers) pour attraper une raquette virtuelle

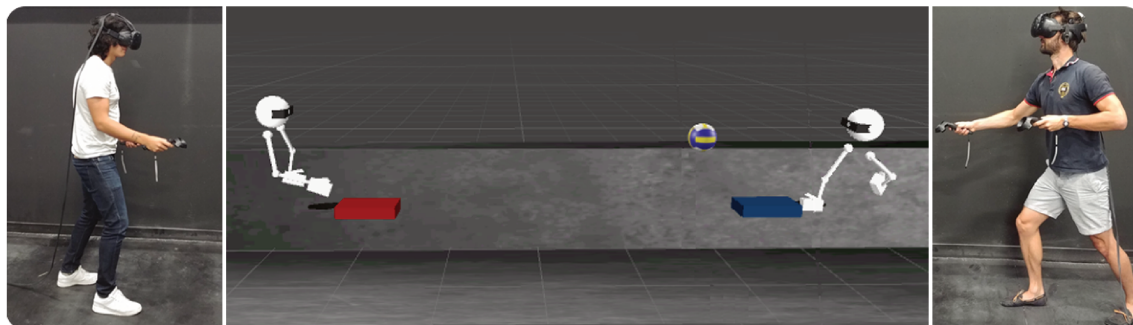


FIGURE 25 – Représentation de l'expérience et l'environnement virtuel utilisé pour étudier la coopération entre deux participants dans une tâche d'interception de balle. Les deux sujets présentés ici ont donné leur accord écrit pour l'utilisation des photographies.

(dimensions(L*I*h) : 40*25*10 cm), placée à une hauteur de 1,3 m, et devaient intercepter les balles en se déplaçant physiquement dans l'espace virtuel et réel. La raquette ne pouvait se déplacer que sur l'axe antéro-postérieur (qu'on appellera maintenant l'axe X) pour intercepter les balles dont la trajectoire était comprise dans le plan sagittal. Ce contrôle de la raquette sur un unique axe permettait de s'assurer que les participants ne pouvaient pas passer autour ou au-dessus de la raquette du partenaire durant la tâche. Les participants pouvaient physiquement se déplacer dans la totalité de la salle virtuelle. Afin d'éviter les collisions physiques réelles entre les sujets, chaque participant évoluait dans son propre environnement physique, mais ils réalisaient la tâche dans un environnement virtuel partagé. Cela signifie que les collisions virtuelles étaient possibles, mais les collisions réelles impossibles. La synchronisation entre les deux systèmes de réalité virtuelle utilisés (modèle HTC Vive) a été faite via un réseau local, menant à une latence système d'environ 33ms, ce qui est proche de la latence du système HTC Vive (22ms, [Niehorster2017]), et même mieux que le seuil de "latence faible" de 50ms défini par [Meehan2003].

4.2.3 Tâche

La tâche à réaliser était divisée en quatre conditions, durant lesquelles les participants devaient intercepter avec la raquette virtuelle les balles tombant du plafond vers le sol de la salle virtuelle dans laquelle ils étaient immergés. Durant la première condition, les participants interceptaient la balle seuls (Figure 26A, que l'on appellera maintenant "AL condition"). Cette condition était utilisée comme condition de référence. Dans la seconde condition, les participants étaient assistés par un partenaire fixe, représenté par une large raquette fixe (longueur : 1,75 m) qui pouvait aussi intercepter les balles (Figure 26B, que l'on appellera maintenant "SP

condition"). La taille et la position de cette raquette fixe ont été calculés afin qu'elle puisse intercepter les balles arrivant loin du participant réel (probabilité d'interception par la raquette fixe : $P = 0,44$), selon une étude pilote que nous avons réalisée [Faure2017]. Les troisième et quatrième conditions étaient réalisées par des équipes de deux participants, à qui il était demandé d'intercepter les balles "en équipe", et non pas individuellement. Dans la troisième condition, les participants pouvaient voir uniquement les mouvements de la raquette de leur partenaire (Figure 26C, que l'on appellera maintenant "PP condition"), tandis que dans la quatrième condition, ils pouvaient voir à la fois le mouvement de la raquette du partenaire, mais aussi son avatar (Figure 26D, qu'on appellera maintenant "AP condition").

L'avatar consistait en une représentation simple, composée de la tête et des membres supérieurs. La tête et les mains de l'avatar étaient animées à partir des mouvements du casque et des controllers. Les mouvements de la tête et des mains étaient recalés sur l'avatar. Les bras de l'avatar ont été reconstruits via des calculs et un script de cinématique inverse, à partir de la position des mains et de la tête. Ce choix d'un avatar simple a été fait pour plusieurs raisons : 1) comme l'objectif principal était d'étudier l'interaction et la perception des trajectoires de balles, il était uniquement nécessaire pour les participants de percevoir les mouvements globaux du partenaire ; 2) l'absence d'indices visuels détaillés comme les expressions faciales ou la direction du regard peut être en partie compensée, par une attention des participants portées à d'autres aspects comportementaux [Roth2016] (déplacement global, orientation de la tête, etc.); et 3) la littérature a montré que le niveau de détails (LOD) n'influait pas la perception du mouvement [Vignais2009, Vignais2010], et il a été suggéré qu'une réduction du stimulus informationnel pourrait même faciliter la perception du mouvement [Lintern1990, Farrow2013].

Pour toutes les conditions, les participants commençaient par se positionner à une extrémité du monde virtuel. Cela signifie que, pour les conditions PP et AP, les participants commençaient l'expérience face-à-face, éloignés d'une distance de 4 mètres, correspondant à la distance totale utilisée pour les expérimentations. Dans la condition SP, une raquette partenaire stationnaire était placée en face des participants. L'environnement virtuel a été construit de manière à ce que les participants puissent, à tout instant, voir à la fois la balle et leur partenaire. Les expérimentateurs étaient positionnés sur le côté. Du point de vue de l'expérimentateur, le participant à droite était noté comme étant le participant P_1 , et le participant à gauche était noté comme étant le participant P_2 . Les participants ont gardé le même côté lorsqu'ils ont réalisé les tâches dans les conditions PP et AP. Ainsi, dans cette étude, la tâche était réalisée seul (AL) ou en collaboration avec un partenaire qui pouvait

être virtuel et statique (SP) ou réel et mobile (PP et AP).

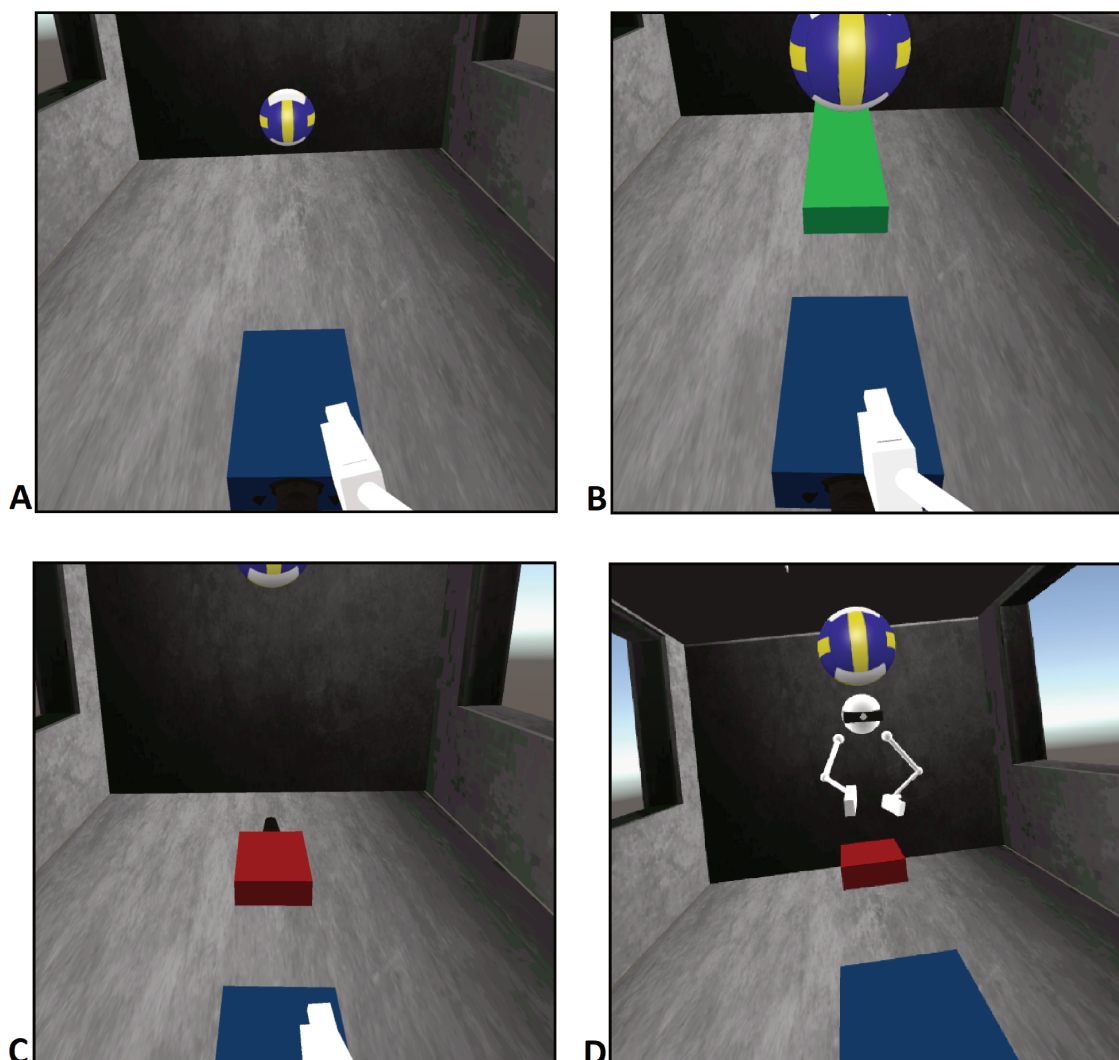


FIGURE 26 – Tâche d'interception - point de vue d'un participant. (A) "Alone Condition" (AL) : le participant réalise la tâche seul. (B) "Stationary Partner Condition" (SP) : le participant réalise la tâche assisté d'une raquette partenaire fixe". (C) "Paddle Partner Condition" (PP) : le participant réalise la tâche assisté d'un partenaire réel, mais ne peut voir que sa raquette. (D) "Avatar Partner Condition" (AP) : le participant réalise la tâche assisté d'un partenaire réel, et peut voir son avatar ainsi que sa raquette.

4.2.4 Procédure

Avant chaque essai, les participants devaient se placer sur leur position de départ, matérialisée par une croix rouge (respectivement bleu) au sol, et placée à une distance de -2 mètres (respectivement 2 mètres) du centre de la scène, selon l'axe X. Lorsque les participants étaient prêts, un expérimentateur démarrait un essai. Dès lors, une

longue trappe située dans le plafond s'ouvrait immédiatement, et la balle bougeait vers le sol à une vitesse de 2,5 m/s, donnant ainsi lieu à des essais durant entre 1,1 et 1,6 secondes. Comme il a été montré que la perception de la trajectoire d'une balle est meilleure lorsqu'une balle colorée est utilisée comparativement à une balle blanche [Lenoir2005], une balle virtuelle de couleur bleu-jaune-blanc (circonférence : 65 cm) a été créée et utilisée pour notre étude (cf. Figure 26).

A partir du protocole de Niek Benerink et collaborateurs (2016) [Benerink2016], les trajectoires de balles ont été choisies à partir de 5 points de départ (situés à une hauteur de 4 m) et cinq points d'arrivée (situés à une hauteur de 1,3 m). Le choix de ces hauteurs a été fait afin que les participants puissent voir à la fois la balle et le partenaire dans leur champ de vision, à tout instant. Les points de départ, de même que les points d'arrivée, étaient séparés deux à deux d'une distance de 0,8 m (coordonnées sur l'axe X : $x = -1,6$ m, $-0,8$ m, 0 m, $+0,8$ m et $+1,6$ m). La combinaison des points de départ et d'arrivée résultaient en une construction de 25 trajectoires, pour un total de 100 essais à intercepter (25 trajectoires * 4 conditions). Il apparaît important de souligner que, pour les conditions PP et AP, les participants réalisaient la tâche par équipe de deux. Cela implique que chaque équipe réalisait 50 essais en conditions AL et SP (25 essais * 2 participants), et seulement 25 essais en conditions PP et AP (voir Figure 27). Ainsi, les 12 équipes ont réalisé au total 600 essais en condition AL (25 essais * 24 participants), 600 essais en condition SP (25 essais * 24 participants), 300 essais en condition PP (25 essais * 12 équipes) et 300 essais en condition AP (25 essais * 12 équipes).

De plus, afin d'éviter une familiarisation avec les points de départ et d'arrivée, une distance aléatoire comprise entre $-0,4$ m et $+0,4$ m était ajoutée à la fois au point de départ et au point d'arrivée, selon l'axe X. Ainsi, les balles pouvaient apparaître n'importe où (sur l'axe X) le long de la trappe, et arriver n'importe où (sur l'axe X) sur la zone d'arrivée, sans modification de l'angle de la trajectoire. Les 5 points de départ et 5 points d'arrivée étaient invisibles pour les participants.

Avant que les expériences ne commencent, il était demandé aux participants de se déplacer dans la salle virtuelle et de réaliser dix essais par condition pour se familiariser avec l'environnement virtuel et la tâche. Lorsque assisté d'un partenaire (stationnaire ou mobile), ils devaient aussi rentrer volontairement en collision avec lui afin de comprendre que l'essai était considéré comme manqué (voir plus loin). Aucun de ces essais n'était enregistré. Les participants ont tous commencé les expériences par la condition AL, c'est-à-dire par la condition où ils étaient seuls pour intercepter la balle. Ensuite, ils ont réalisé les trois autres conditions dans un ordre aléatoire. Afin d'éviter une fatigue excessive (à cause de l'expérience ou d'une utilisation prolongée

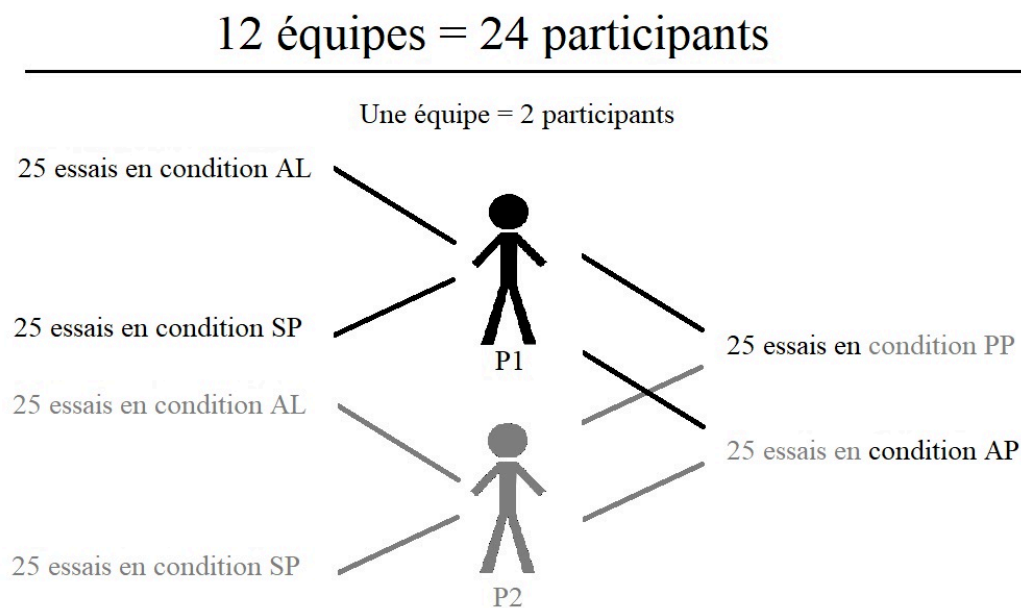


FIGURE 27 – **Représentation schématique du déroulement de l'expérience.** Chaque participant réalisait 25 essais dans la condition AL, et 25 essais dans la condition SP. Chaque équipe (de deux participants) réalisait 25 essais dans la condition PP, et 25 essais dans la condition AP.

du système de réalité virtuelle), une pause de 5 minutes minimum était donnée aux participants entre chaque condition.

Un essai était considéré comme réussi lorsque la balle était interceptée avec la raquette, sans collision. Un essai était considéré comme manqué lorsqu'aucun des participants n'interceptait la balle, ou lorsqu'une collision entre les raquettes survenait. Si la balle était interceptée mais qu'une collision survenait juste après, l'essai était considéré comme manqué. Un message était affiché à la fin de chaque essai pour informer les participants de la réussite ou non de l'essai. À la fin de chaque essai, il était demandé aux participants de retourner à leur point de départ, puis l'expérimentateur lançait un nouvel essai lorsqu'ils étaient prêts. Pour les conditions PP et AP, c'est-à-dire les conditions où des équipes de deux participants réels réalisaient la tâche, aucune communication verbale n'était autorisée avant ou pendant les expériences. Ce choix d'interdire les communications verbales était fait afin que les participants se focalisent uniquement sur les mouvements du partenaire (et/ou de sa raquette) pour décider s'ils devaient ou non réaliser l'interception.

4.2.5 Variables dépendantes et analyse

Les déplacements de la tête et des mains des participants ont été enregistrés à partir des déplacements du casque et des contrôleurs du système HTC Vive utilisé.

Comme les dimensions de l'environnement virtuelles ont été choisies pour correspondre aux dimensions de l'environnement réel (*i.e.* un déplacement de 1 m dans l'environnement virtuel correspond à un déplacement de 1 m dans le réel, par exemple), les déplacements étaient les mêmes dans les mondes virtuel et physique.

Le score d'interception était calculé en pourcentage de balles interceptées par rapport au nombre total d'essais, pour chacune des conditions. Le nombre des collisions et leur lieu ont aussi été récupérés.

Dans une étude préliminaire, nous avons trouvé que, lorsque les participants sont assistés d'un partenaire stationnaire, ils ratent des essais qu'ils étaient capables d'intercepter lorsqu'ils réalisaient la tâche seuls [Faure2017] : la présence d'un partenaire fixe a entraîné une moindre efficacité des participants pour l'interception de balles proches du partenaire, bien que l'interception globale était meilleure. Pour évaluer si des résultats similaires étaient trouvés dans cette étude, lors des essais manqués en conditions AL et SP, nous avons calculé la "distance à couvrir", c'est à dire la distance entre la position de départ de la raquette du participant, et la position d'arrivée de la balle, pour les balles devant être interceptées par le participant. Cela signifie que, pour établir la "distance à couvrir", nous avons exclu des résultats de la condition AL toutes les balles manquées dont le point d'arrivée se situait dans la zone où était positionné le partenaire fixe dans la condition SP. Cette distance peut alors être vue comme la distance que le participant aurait dû couvrir pour intercepter la balle : plus cette valeur moyenne était faible, plus les balles manquées ont atterri proche de la position de départ du participant. Ainsi, nous pouvons évaluer si les participants ont manqué des essais dans la condition SP qu'il étaient capables d'intercepter dans la condition AP, comme trouvé dans notre étude pilote. De manière plus générale, nous avons cherché à savoir si une certaine interférence apparaissait ou non entre les participants durant les conditions collaboratives, et comment la complexité de la tâche et les indices visuels disponibles pouvaient influencer cette interférence.

Durant un essai, l'initiation de mouvement a été définie comme le premier instant où la vitesse de la main du participant dépassait la valeur seuil de 0,5 m/s, avec un déplacement minimum de 10 cm sur l'axe X. De plus, lorsque la balle était interceptée, le lieu d'interception était enregistré. Lorsque la balle n'était pas interceptée, la position finale de la balle (= lieu théorique d'interception) était enregistrée.

Le traitement des données, les analyses des variables et les statistiques ont été réalisés avec le logiciel R [RCORE-TEAM2016], et le seuil de significativité a été fixé à 0,05. La normalité des données a été testée avec un test de Shapiro-Wilk. Les tailles d'effets ont été utilisées pour évaluer la force des effets statistiques observés, et calculées via les η_p^2 partiels pour les ANOVA (ANALYSIS OF VARIANCE)

(mesure via l'échelle de Cohen ; petit effet : $0,01 < \eta_p^2 < 0,06$, effet moyen : $0,06 < \eta_p^2 < 0,14$, et large effet : $\eta_p^2 > 0,14$), et le d de Cohen pour les comparaisons deux à deux (mesure via l'échelle de Cohen ; petit effet : $0,2 < d < 0,5$, effet moyen : $0,5 < d < 0,8$, et large effet : $d > 0,8$).

4.3 Résultats

4.3.1 Interceptions et collisions

Avant tout, pour nous assurer qu'il n'existait pas d'effet du genre sur la performance, nous avons réalisé une ANOVA à deux voies sur la performance d'interception avec le genre (homme ou femme) comme facteur inter-participants, et la condition (AL, SP, PP et AP) comme facteur intra-participants. Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence de performance entre les hommes et les femmes, pour toutes les conditions [$\eta_p^2 = 0,02$; $p = 0,71$].

Le score global d'interception durant l'expérience a été calculé pour chacune des conditions (Tableau 1). Lorsque les participants étaient seuls (AL), ils ont intercepté $53,00 \pm 11,20$ % des balles. Lorsqu'ils étaient assistés d'un partenaire fixe (SP), le score global d'interception était supérieur ($89,33 \pm 6,46$ %). Lorsqu'ils ont réalisé la tâche avec un partenaire réel (PP et AP), la performance était aussi bonne ($83,00 \pm 7,84$ and $86,33 \pm 9,86$ %, respectivement). Un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis a révélé un effet significatif de la condition sur la performance [$\chi^2 = 47,35$; $df = 3$; $p < 0,001$], et un test sur les rangs de Wilcoxon (correction de Bonferroni) a mis en avant une performance significativement plus faible durant AL comparée à SP, PP et AP [d 's $> 0,8$; p 's $< 0,001$]. De plus, il n'existait pas de différence de performance entre SP, PP et AP.

Les collisions avec le partenaire ont été très rares (Tableau 1), que le partenaire soit fixe (SP, 3 collisions) ou réel (PP et AP, 7 et 6 collisions, respectivement).

Pour s'assurer que la position et la taille de la raquette partenaire en condition SP étaient correctement choisis, nous avons regardé le nombre d'essais manqués par sujet dans la condition AL en fonction du point d'arrivée (Figure 28). Comme attendu, lorsque le point d'arrivée était loin du participant (*i.e.* Gate0 et Gate1), les essais étaient majoritairement manqués ($86,67 \pm 19,69$ % et $83,33 \pm 18,74$ % d'essais manqués, respectivement). À l'inverse, lorsque la position d'arrivée de la balle était proche des participants (*i.e.* Gate3 et Gate4), les essais étaient majoritairement réussis ($8,33 \pm 15,86$ % et $1,67 \pm 5,77$ % d'essais manqués, respectivement). Finalement, lorsque la position d'arrivée de la balle était celle du milieu, les participants ont manqué $45 \pm 21,11$ % des essais. Cette observation est concordante avec

le choix, dans la condition SP, de placer le partenaire fixe afin qu'il intercepte les balles que le participant avait du mal à intercepter dans la condition AL. De plus, afin de s'assurer que les participants ont correctement intercepté les balles arrivant proche de leur position de départ (*i.e.* Gate3 et Gate4) dans toutes les conditions, une ANOVA à deux voies a été réalisée sur le pourcentage d'interception avec la porte d'arrivée (Gate3 et Gate4) comme facteur interpersonnel, et la condition (AL, SP, PP et AP) comme facteur intrapersonnel. Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence dans la performance, pour toutes les conditions [$\eta_p^2 = 0,02$; $p = 0,66$] : les participants ont correctement intercepté les balles les plus proches, pour toutes les conditions.

TABLE 1 – Score global d'interception et nombre de collisions durant l'expérience

*** : significativement différent de AL ($p < 0,001$)

Condition	Score global d'interception (% \pm ET)	Collisions (nombre et % des essais)
Condition AL	53,00 \pm 11,20	-
Condition SP	89,33 \pm 6,46 ***	3 (0,5%)
Condition PP	83,00 \pm 7,84 ***	7 (2,33%)
Condition AP	86,33 \pm 9,86 ***	6 (2%)

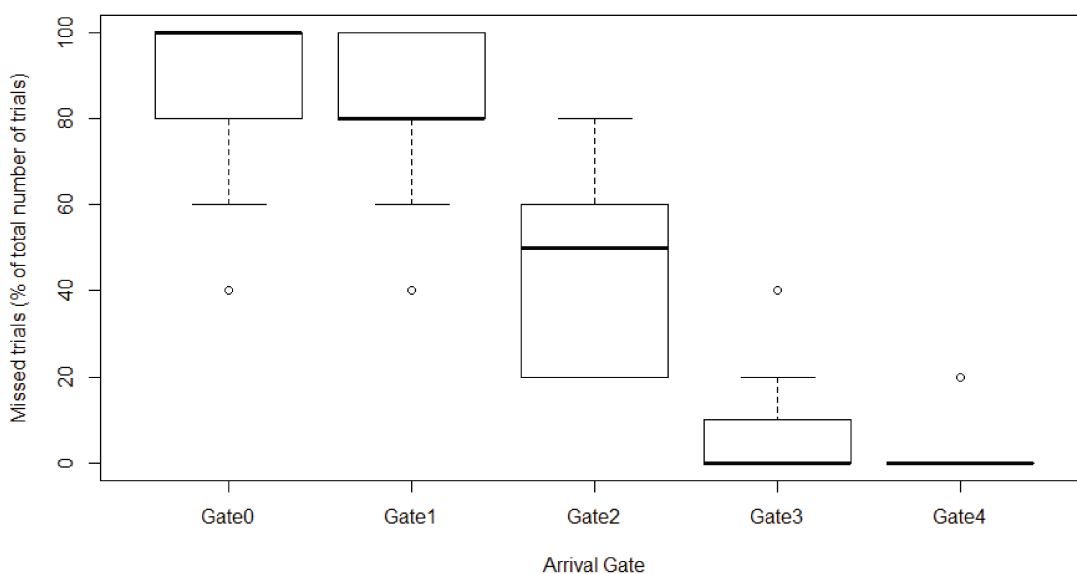


FIGURE 28 – Moyenne des scores d'interception (en % par sujet, relativement à la position d'arrivée de la balle, lorsque les participants étaient seuls (Condition AL))

4.3.2 Zone d'incertitude

L'analyse de la "distance à couvrir" a révélé que cette distance lors des essais manqués était plus faible dans la condition SP ($1,99 \pm 0,16$ m) que dans la condition AL ($2,18 \pm 0,15$ m), et cette différence était significative [t-test : $t(49) = 4,45$; $p < 0,001$] : lorsque assisté par un partenaire fixe, les participants ont été moins efficaces dans l'interception de balles qui tombaient proche du partenaire fixe (voir Figure 29). Pour confirmer cette observation, nous avons analysé le score d'interception comme fonction de la position d'arrivée de la balle (Figure 30). Les interceptions réalisées par les participants (P_1) sont présentées en vert, et les interceptions réalisées par le partenaire fixe ($Stationary_P$) sont présentées en bleu. De la même manière, les positions d'arrivée des balles manquées sont représentées par des points rouges pour les collisions (*i.e.* lorsque la raquette du participant entrait en contact avec le partenaire fixe) et des points jaunes pour les essais non-interceptés (*i.e.* lorsque ni le participant ni le partenaire fixe n'interceptait la balle). Lorsque la balle était manquée ou qu'une collision se produisait, la position finale de la balle était souvent proche du partenaire fixe. Ainsi, cela suggère que la capacité des participants à coordonner l'interception avec un partenaire fixe était très bonne (haut score global d'interception et peu de collisions), mais que la performance était moins bonne lorsque le point d'arrivée de la balle était proche de la raquette du partenaire fixe (cette zone de moindre performance sera maintenant notée comme "zone d'incertitude"). De plus, seules quelques interceptions ont été réalisées par le participant dans cette "zone d'incertitude", bien que les domaines d'interception étaient bien définis : en effet, comme le partenaire ne pouvait pas bouger, son domaine théorique d'interception était fixe. Pour aller plus loin dans l'analyse, nous avons utilisé une fonction logit [Hosmer2000] et affiché la courbe de régression logistique représentant la probabilité que P_1 (probabilité $P=1$) ou $Stationary_P$ (probabilité $P=0$) intercepte la balle, comme fonction de la position finale de la balle. Si les domaines d'interception étaient parfaitement définis, la séparation devrait être complète, c'est-à-dire qu'il serait possible de trouver "un vecteur α qui assigne parfaitement toutes les observations à un groupe" [Albert1984]. En conséquence, dans notre cas précis, la probabilité P devrait être égale à 0 pour toutes les balles arrivant sur le partenaire fixe, et égale à 1 partout ailleurs. Pour quantifier la différence entre cette séparation théorique et la séparation réelle, nous avons étudié le *Median Effective Level* (MEL) [Bewick2005], c'est-à-dire le point de l'axe X qui correspond à l'égalité des deux probabilités d'interception, *i.e.* lorsque $P(P_1) = P(Stationary_P) = 0,5$. Cette valeur représente la distance entre la frontière théorique de séparation des domaines (donc ici, dans la condition SP, le bord proximal de la raquette du partenaire), et la frontière réelle. Le MEL dans la condition

SP était ici de 10,5 cm, ce qui indique une déviation de la frontière de séparation de 10,5 cm en direction du participant. Pour mieux quantifier la zone d'incertitude précédemment définie, la pente de la courbe de régression logistique a été utilisée, et en particulier, nous avons étudié la valeur de *l'overlap*, défini par Cox et Snell (1989) comme la distance entre les points de 5% et 95% de cette courbe [Cox1989]. Nous avons fait ce choix pour adopter une approche similaire aux travaux de Benenink et collaborateurs (2016), afin de discuter et analyser nos résultats sur *l'overlap* comparativement à la littérature. *L'overlap* pour la condition SP était de 38,5 cm, et représentait ici une quantification mathématique de la zone d'incertitude. Cela signifie que, dans cette zone large de 38,5 cm, les participants avaient des difficultés à juger s'ils devaient ou non intercepter eux-mêmes la balle.

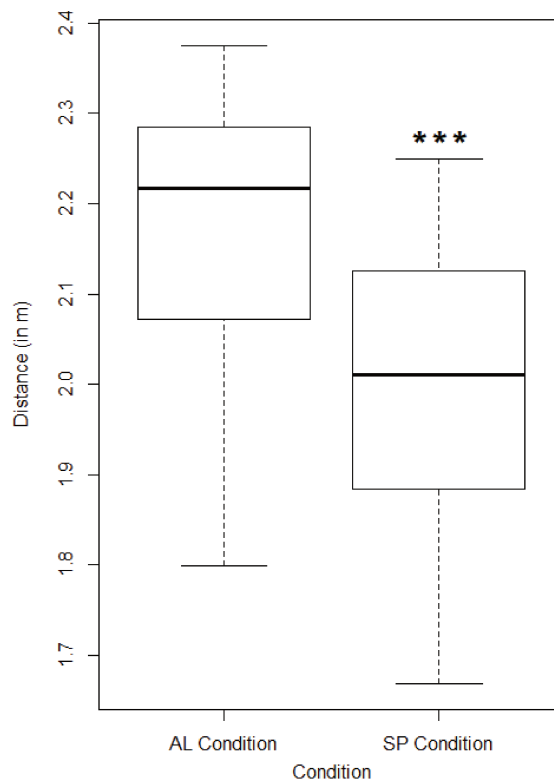


FIGURE 29 – Distance moyenne que les participants auraient dû couvrir lors des essais manqués, et lorsque la balle devait être interceptée par le participant, pour les conditions AL et SP

*** : significativement différent de AL ($p < 0,001$)

Afin d'examiner un potentiel effet du côté sur la performance dans les conditions PP et AP, c'est-à-dire une potentielle différence de performance entre P_1 et P_2 , nous avons réalisé une ANOVA à deux voies sur le score d'interception avec le côté (P_1 et P_2) comme facteur interpersonnel, et la condition (PP et AP) comme facteur intrapersonnel. Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence dans la

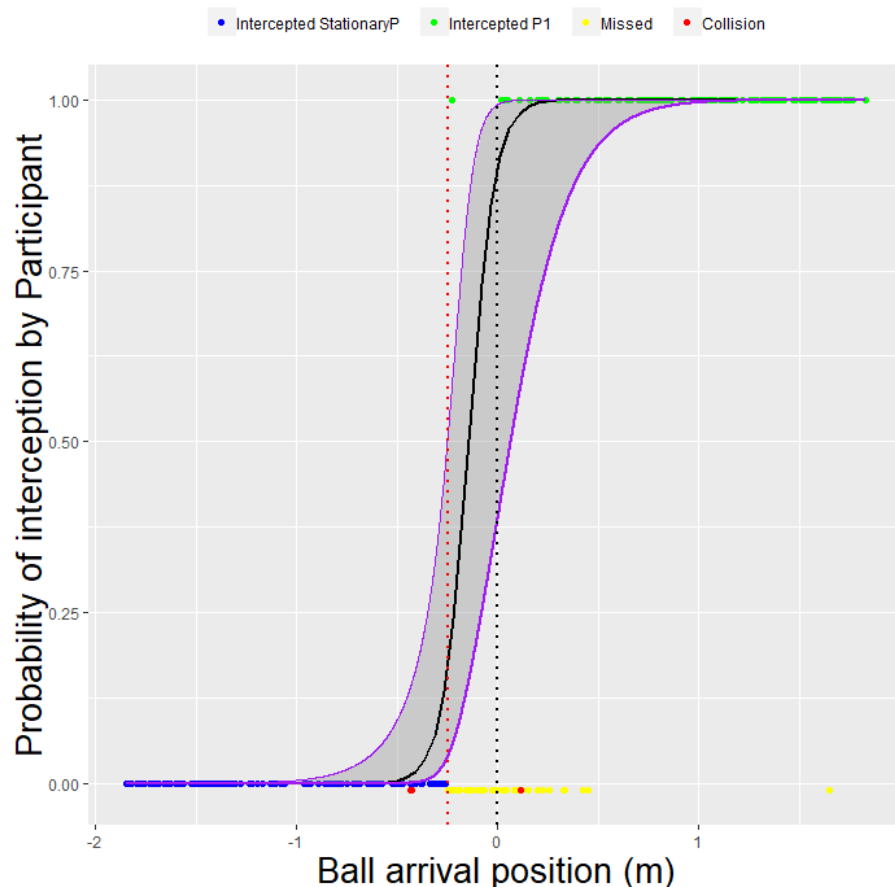


FIGURE 30 – **Résumé graphique de la performance d'interception de balle comme fonction de la position d'arrivée de la balle (Condition SP).** Les points verts représentent les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant, et les points bleus les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le partenaire fixe. Les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles lors des essais manqués sont indiquées par les points jaunes (essais non-interceptés) et les points rouges (collisions). La ligne pointillée verticale noire indique le centre de l'axe X d'interception, et la ligne pointillée verticale rouge indique la limite physique du bord proximal de la raquette partenaire. La courbe noire représente la courbe de régression logistique relative à la probabilité que P_1 ($P = 1$) ou $Stationary_P$ ($P = 0$) intercepte la balle, comme fonction de la position finale de la balle. Les courbes violettes représentent l'intervalle de confiance à 95%.

performance entre P_1 et P_2 , pour chacune des deux conditions [$\eta_p^2 = 0,0007$; $p = 0,86$].

En utilisant une régression logistique comme précédemment expliqué, nous avons si la zone d'incertitude serait influencée par l'interaction entre deux participants réels. Les figures 31 et 32 présentent des résumés graphiques de l'interception des balles comme fonction de la position d'arrivée de la balle, pour les conditions PP et AP, respectivement. Dans la condition PP, la MEL était de -12,2 cm, et l'*overlap*

de 59,4 cm. Dans la condition AP, la MEL était de -1,2 cm et l'*overlap* de 49,1cm. De plus, pour supporter l'idée que la zone d'incertitude était localisée autour de la frontière de séparation des domaines théoriques d'interception, nous avons trouvé que pour les essais manqués, lorsqu'aucun mouvement d'interception n'était initié par aucun des participants, la position d'arrivée de la balle était très souvent centrale, dans la condition SP (86,27% des essais manqués), la condition PP (66,67% des essais manqués) et la condition AP (82,35% des essais manqués).

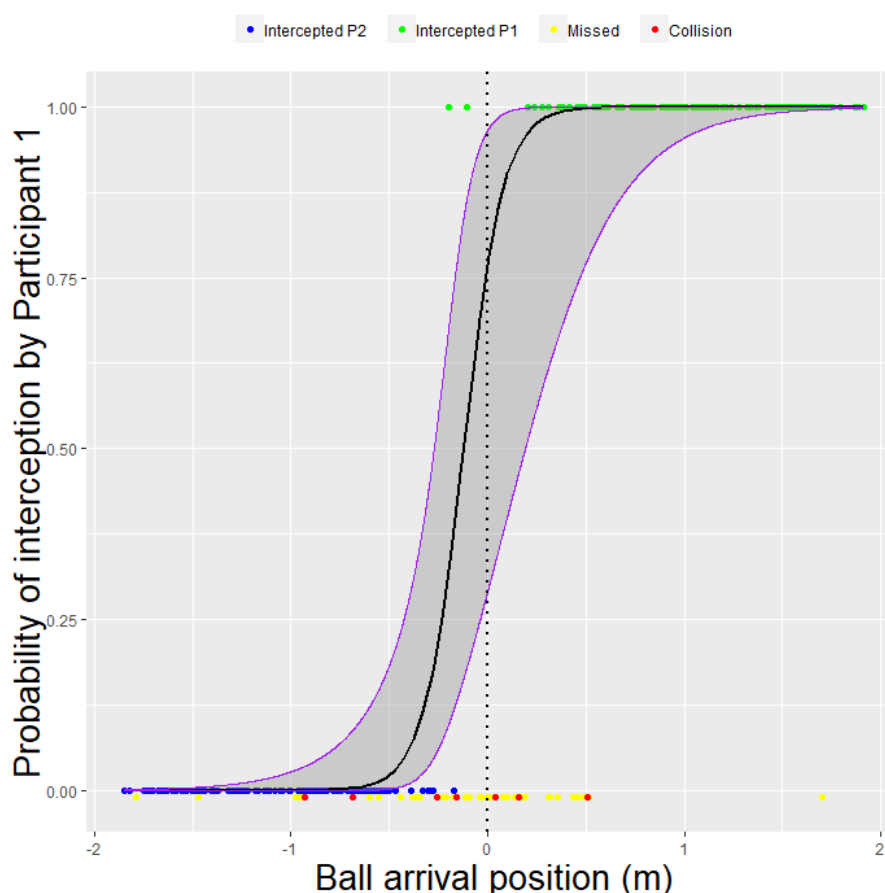


FIGURE 31 – **Résumé graphique de la performance d'interception de balle comme fonction de la position d'arrivée de la balle (Condition PP).** Les points verts représentent les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 1, et les points bleus les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 2. Les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles lors des essais manqués sont indiquées par les points jaunes (essais non-interceptés) et les points rouges (collisions). La ligne pointillée verticale noire indique le centre de l'axe X d'interception. La courbe noire représente la courbe de régression logistique relative à la probabilité que P_1 ($P = 1$) ou P_2 ($P = 0$) intercepte la balle, comme fonction de la position finale de la balle. Les courbes violettes représentent l'intervalle de confiance à 95%.

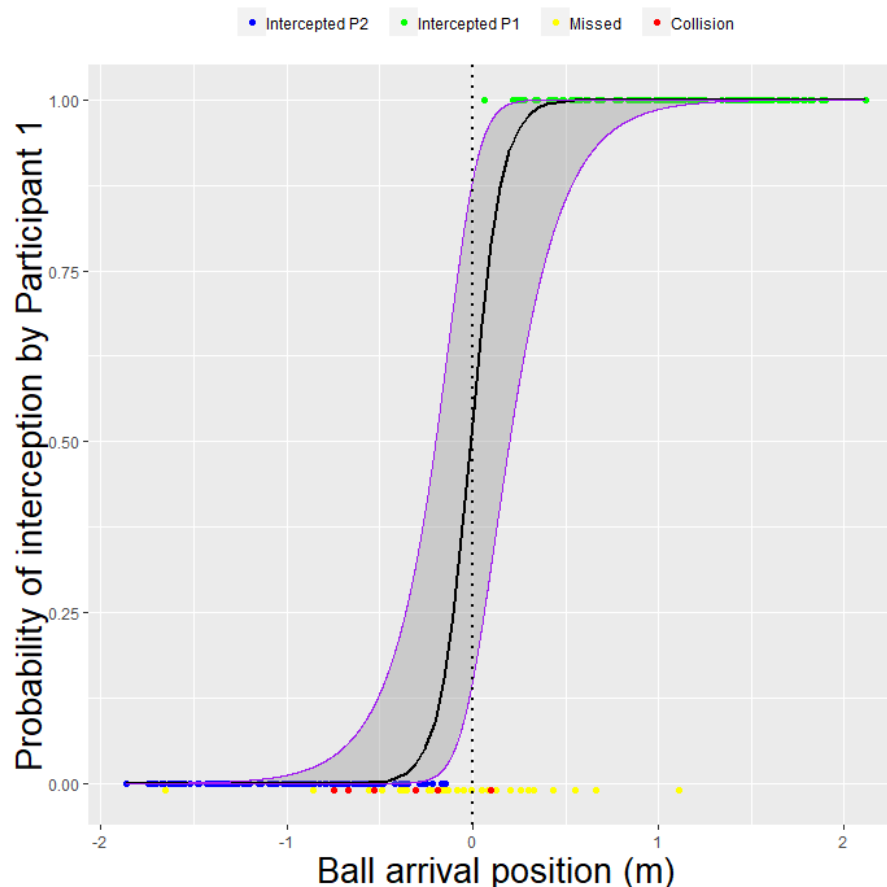


FIGURE 32 – **Résumé graphique de la performance d'interception de balle comme fonction de la position d'arrivée de la balle (Condition AP)**. Les points verts représentent les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 1, et les points bleus les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 2. Les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles lors des essais manqués sont indiquées par les points jaunes (essais non-interceptés) et les points rouges (collisions). La ligne pointillée verticale noire indique le centre de l'axe X d'interception. La courbe noire représente la courbe de régression logistique relative à la probabilité que P_1 ($P = 1$) ou P_2 ($P = 0$) intercepte la balle, comme fonction de la position finale de la balle. Les courbes violettes représentent l'intervalle de confiance à 95%.

4.3.3 Moment d'initiation du mouvement d'interception

Pour étudier l'influence des conditions sur la cinématique du mouvement des participants, nous avons regardé le moment de l'initiation de mouvement, pour chacun des essais. Le Tableau 2 montre que le mouvement a été initié plus tard lorsque un partenaire réel était présent comparé à la situation où le participant était seul. Une ANOVA à mesures répétées a confirmé cette influence de la condition sur le moment d'initiation de mouvement [$\eta_p^2 = 0,10$; $p < 0,05$], et un test post-hoc HSD (Honestly

Significant Difference) de Tukey a révélé que l'initiation de mouvement était plus tardive dans les conditions PP et AP comparées à la condition AL [p 's < 0,05]. Un autre résultat intéressant est que, lorsque l'on s'intéresse uniquement aux essais interceptés, cette différence n'est plus significative [ANOVA : $\eta_p^2 = 0,01$; $p = 0,33$]. D'un autre côté, lorsque l'on regarde uniquement les essais manqués, l'ANOVA à mesures répétées a révélé une influence de la condition sur le moment d'initiation du mouvement [$\eta_p^2 = 0,15$; $p < 0,001$], et le test post-hoc HSD de Tukey a confirmé cette observation avec une initiation de mouvement plus tardive dans les conditions PP et AP comparées aux conditions AL et SP [p 's < 0,05]. Finalement, aucune différence n'est apparue entre les essais réussis et manqués, pour toutes les conditions [$\eta_p^2 = 0,13$; $p = 0,11$].

TABLE 2 – Moyenne du temps d'initiation de mouvement des participants pour toutes les conditions, pour l'ensemble des essais, pour les essais interceptés uniquement, et pour les essais manqués uniquement

* : significativement différent de AL ($p < 0,05$)

† : significativement différent de SP ($p < 0,05$)

<i>Condition</i>	<i>Moyenne du temps d'initiation de mouvement pour l'ensemble des essais (en ms, M ± ET)</i>	<i>Moyenne du temps d'initiation de mouvement pour les essais réussis (en ms, M ± ET)</i>	<i>Moyenne du temps d'initiation de mouvement pour les essais manqués (en ms, M ± ET)</i>
<i>Condition AL</i>	602 ± 127	617 ± 122	524 ± 127
<i>Condition SP</i>	632 ± 152	641 ± 150	573 ± 77
<i>Condition PP</i>	650 ± 150 *	651 ± 153	655 ± 138 * †
<i>Condition AP</i>	654 ± 141 *	652 ± 141	664 ± 144 * †

4.3.4 Abandon du mouvement d'interception

Dans les conditions PP et AP, l'interception pouvait être réalisée uniquement par l'un des deux participants, mais les deux participants pouvaient initier un mouvement d'interception. Dans ce cas, cela signifie que l'un d'entre eux doit stopper son mouvement pour laisser son partenaire intercepter la balle. Au regard de cet aspect, nous avons étudié si la porte de départ ou la porte d'arrivée pouvaient avoir une influence sur l'abandon du mouvement d'interception. Pour être considéré comme un "essai abandonné", un essai devait remplir trois conditions : 1) le participant avait un déplacement minimal de 50 cm sur l'axe X, 2) la vitesse de la raquette du participant devenait nulle ou négative durant l'essai, et 3) l'interception était *in*

fine réalisée par son partenaire. Nous n'avons trouvé aucune influence de la porte d'arrivée [$\eta_p^2 < 0,01$; $p = 0,20$], mais une influence significative de la porte de départ [$\eta_p^2 = 0,04$; $p < 0,01$] de la balle sur l'abandon du mouvement d'interception dans les conditions PP et AP. Le test post-hoc HSD de Tukey a révélé que les participants stoppaient leur mouvement plus tôt lorsque la porte de départ de la balle était plus lointaine.

4.4 Discussion

Dans cette étude, nous avons examiné la façon dont deux personnes interagissent et interfèrent dans une tâche collaborative d'interception de balle.

Pour commencer, nous avons cherché à savoir si les résultats mis en avant par Benerink et collaborateurs (2016) dans un environnement en 2 dimensions [Benerink2016] pourraient être retrouvés dans une situation impliquant un affichage stéréoscopique et un engagement physique global dans la tâche. Plus précisément, l'intérêt principal de cette étude était de comprendre comment une zone d'incertitude pouvait apparaître et évoluer, en fonction de la situation. Nous avons aussi regardé la façon dont les participants auto-adaptent leur action d'interception de balle suivant plusieurs conditions. D'une approche similaire à celle de Benerink et collaborateurs (2016), notre setup a été construit sur la décision mutuelle et implicite de qui va réaliser l'interception, tout en évitant les collisions avec le partenaire. Comme nous avons souhaité nous concentrer uniquement sur les indices visuels disponibles, toute communication verbale entre les participants était interdite. Les quatre conditions que nous avons utilisé dans notre étude offraient alors différents niveaux d'information visuelle disponible : dans la condition AL, les participants étaient seuls pour réaliser la tâche, et n'avaient donc qu'à prendre l'information venant de la balle et de son déplacement. Dans la condition SP, ils étaient assistés d'un partenaire fixe (pas d'incertitude sur son mouvement), afin qu'ils doivent juger si la balle serait ou non interceptée par ce partenaire fixe. Ainsi, le jugement reposait sur les informations venant de la balle et son déplacement, par rapport au positionnement du partenaire fixe. Dans la condition PP, les participants devaient évaluer le déplacement de la balle, tout en prenant en compte le résultat de l'action du partenaire (*i.e.* le déplacement de sa raquette). Enfin, l'information disponible dans la condition AP était similaire à celle disponible dans la condition PP, mais de plus, les participants voyaient les mouvements de la tête et des membres supérieurs de leur partenaire.

4.4.1 Interceptions et collisions

Le principal résultat a montré une bonne performance d'interception, avec des scores supérieurs dans les conditions SP, PP et AP, comparés à la condition AL : la performance globale était donc meilleure lors des conditions collaboratives. Ceci paraît logique, car la majorité des essais manqués dans la condition AL l'était pour les balles les plus éloignées (voir Figure 28), c'est-à-dire les balles interceptées par le partenaire dans les conditions SP, PP et AP. Un second résultat a mis en avant la bonne capacité des participants à coordonner efficacement leurs actions, par le faible nombre de collisions avec la raquette partenaire observé (16 collisions sur un total de 1200 essais réalisés en conditions collaboratives).

4.4.2 Pattern d'interception et zone d'incertitude

Cependant, lors d'une analyse plus poussée de ces observations, la "distance à couvrir" a montré que dans la condition SP les participants avaient manqué des essais qu'ils étaient capables d'intercepter lorsqu'ils étaient seuls (condition AL). Ainsi, lorsqu'ils étaient assistés d'un partenaire fixe, les participants étaient moins efficaces dans l'interception des balles dont la position d'arrivée était proche du partenaire fixe. La littérature a montré que les balles virtuelles sans effet de spin pouvaient être efficacement interceptées [Dessing2010, Craig2006, Craig2009, Craig2011, Bootsma2016], comme cela a aussi été le cas dans notre étude. Ainsi, cela suggère que les erreurs réalisées par les participants dans la condition SP seraient dues à des erreurs de jugement dans la trajectoire de la balle : les participants n'ont pas essayé d'intercepter les balles lorsqu'ils pensaient qu'elles seraient interceptées par le partenaire fixe, même si ce n'était pas *in fine* le cas. Dans ce contexte, la zone d'incertitude reflète la zone où les participants ont eu des difficultés à juger la trajectoire de balle.

Pour mieux analyser cette idée, nous avons regardé qui interceptait la balle, et où, dans la condition SP. Si la division de l'espace d'interception semble plutôt bien établie (Figure 30) -le participant interceptant les balles proches de lui et le partenaire fixe interceptant les plus lointaines (du point de vue du participant)- nous pouvons voir que la plupart des essais manqués sont survenus lorsque la position d'arrivée de la balle était proche du bord proximal de la raquette partenaire. La zone d'incertitude quantifiée à partir de la régression logistique précédemment établie a montré une largeur de 38,5 cm dans la condition SP. Cependant, le MEL a révélé que cette zone était centrée à 10,5 cm de l'extrémité du bord proximal de la raquette partenaire. Logiquement, la zone d'incertitude se situait donc autour du MEL, sur une

largeur de 19,25 cm de chaque côté. La zone d'incertitude était donc partiellement localisée sur la raquette partenaire, ce qui n'est pas possible car le partenaire dans la condition SP est fixe, et intercepte toujours les balles qui terminaient dans sa zone d'interception. Le modèle de régression logistique a donc par la suite été corrigé, et révélait une zone d'incertitude de 29,75 cm de large, dont la limite distale était sur le bord proximal de la raquette partenaire (du point de vue du participant). Nous avons ensuite tenté de caractériser la façon dont la zone d'incertitude pouvait être influencée par les informations visuelles disponibles sur le partenaire réel. Dans les conditions PP et AP, la division de l'espace d'interception était plutôt bien définie (Figures 31 et 32), avec P_1 (respectivement P_2) interceptant la majorité des balles arrivant dans la moitié positive (respectivement négative) de l'espace d'interception. La régression logistique réalisée a révélé que la zone d'incertitude avait une largeur de 59,4 cm pour PP, et 49,1 cm pour AP. Une tâche d'interception collective a alors créé de l'interférence entre les participants, et mis en avant l'apparition d'une zone d'incertitude, que le partenaire soit réel ou non. De plus, l'incertitude a augmenté lorsque les individus ont réalisé la tâche avec un partenaire réel, comparé à un partenaire fixe. Ceci semble logique, car un partenaire réel implique des mouvements imprévisibles, contrairement à un partenaire fixe. Finalement, la zone d'incertitude était plus large lorsque les participants avaient des indices visuels disponibles uniquement sur l'action résultante du partenaire, et non pas sur ses mouvements (*i.e.*, PP vs AP). Cela suggère que les participants ont prélevé de l'information venant des mouvements de la tête et des membres supérieurs du partenaire, afin de mieux organiser leur interception, et la réaliser de manière plus efficace. L'interférence entre les participants semble dès lors conditionnée par la complexité de la tâche (partenaire mobile *vs.* fixe), ainsi que par l'information visuelle disponible sur le partenaire (partenaire + raquette *vs.* raquette seulement).

De même que précédemment, les essais où aucun mouvement d'interception n'a été initié par aucun des participants ont pour la plupart eu lieu lorsque la position d'arrivée de la balle se situait proche du centre de la scène, indiquant là encore que les deux participants pensaient que l'interception serait réalisée par le partenaire. Ce résultat, cependant, n'est pas en accord avec les observations faites par Benerink et al. (2016), qui ont trouvé qu'une position d'arrivée de la balle proche du centre menait rarement à une absence d'initiation de mouvement, mais plutôt à une initiation de mouvement de la part des deux partenaires, avant que l'un d'eux n'abandonne son mouvement d'interception [Benerink2016]. Cette différence pourrait être dû au fait que, dans notre situation, les participants devaient intercepter la balle par un engagement physique complet. Cette différence supporte l'idée que, pour maintenir

la boucle perception-action, une implication physique dans la tâche pourrait être importante ([Craig2013, Farrow2013]), et les résultats observés peuvent être influencés par cet engagement physique. De plus, du fait de cet engagement physique, l'évitement de collision (une fois le mouvement d'interception engagé) était plus difficile dans notre tâche comparé à celle de l'étude de Benerink. Ainsi, nous pouvons penser que, lorsque les participants avaient des doutes quant à la position finale de la balle -et donc des doutes sur qui devait l'intercepter-, ils ont choisi de compter sur le partenaire plutôt que sur leur propre action, pour éviter les risques de collision.

4.4.3 Moment d'initiation du mouvement d'interception

L'analyse de la cinématique de déplacement des participants a montré que le mouvement d'interception était initié plus tard lorsque deux participants réels réalisaient la tâche (conditions PP et AP, voir Tableau 2). Il semble donc que les participants aient attendu plus longtemps avant d'initier un mouvement lorsqu'ils étaient assistés d'un partenaire réel. En revanche, nous n'avons pas trouvé d'influence de l'information visuelle disponible sur l'initiation de mouvement, lorsque deux partenaires réels réalisaient la tâche (*i.e.*, pas de différence entre PP et AP). Ces différences peuvent s'expliquer par plusieurs éléments. Premièrement, l'incertitude liée à la tâche a ajouté une phase de retard avant que le mouvement ne soit initié. Ceci est en accord avec l'étude de Richardson et collaborateurs (2015) sur la dynamique comportementale d'une tâche interpersonnelle d'évitement de collisions [Richardson2015]. Les auteurs ont en effet montré que les participants adoptaient rapidement un pattern stable et asymétrique de coordination de mouvements, mais ont aussi mis en évidence l'apparition d'une phase d'observation entre les participants, ce qui semble aussi être le cas dans notre étude. Cela suggère que les participants utilisent précocement les informations visuelles disponibles sur l'action du partenaire avant de sélectionner et réaliser leurs propres actions. Deuxièmement, comme les participants prélèvent de l'information de manière continue sur l'action de leur partenaire, la tâche est plus complexe que lorsqu'ils sont seuls (condition AL). Leur temps de réaction est dès lors plus important, car ce temps de réaction dépend de la difficulté de la tâche [Darbutas2013]. Par exemple, Laszlo et Liversey (1977) ont établi que le temps de réaction était supérieur de 100ms lorsque les mouvements étaient dirigés vers un but précis, avec d'importantes contraintes de précisions [Laszlo1977]. Troisièmement, Benerink et collaborateurs (2016) ont suggéré que la décision de qui intercepte la balle n'est pas seulement basée sur une simple division géométrique de l'espace, mais repose également sur une interaction continue entre les participants [Benerink2016]. Orban de Xivry et collaborateurs (2017) ont aussi expliqué que le cerveau peut

s'adapter pour démarrer un mouvement, puis le modifier ensuite en se basant sur les nouvelles informations qui lui arrivent [Orban de Xivry2017]. Ces éléments suggèrent la nécessité pour le participant de s'adapter à la situation et à son partenaire, en modifiant sa propre action d'interception de manière continue.

4.4.4 Abandon du mouvement d'interception

Dans notre étude, un essai était considéré comme réussi (dans les conditions PP et AP) lorsqu'un participant interceptait la balle sans collision avec le partenaire, mais les deux participants pouvaient initier ce mouvement d'interception. Dans ce dernier cas, l'un des deux participants devait abandonner son mouvement d'interception pour ne pas interférer avec le partenaire, et éviter toute collision avec lui. Ainsi, pour mieux comprendre l'influence de la complexité de la tâche sur l'action des participants ainsi que sur la coordination continue, nous avons regardé les essais où a eu lieu un abandon du mouvement d'interception (cf. détails dans la partie Résultats). Nous avons trouvé que la porte de départ influençait la cinématique d'interception des participants : plus la porte de départ de la balle était loin, plus l'interception était abandonnée tôt. Il est intéressant d'observer que les participants ont souvent interprété une balle qui apparaissait proche d'eux comme une balle qu'ils devaient intercepter, même si sa trajectoire était dirigée vers le partenaire et était finalement interceptée par lui. Cependant, les participants ont été capables d'abandonner leur mouvement d'interception, en se basant sur les informations continues qu'ils recevaient de la balle et du partenaire. De plus, lorsque l'on s'est intéressé uniquement aux essais manqués, nous avons trouvé que l'initiation de mouvement était plus tardive dans les conditions PP et AP comparé à la condition AL. En effet, dans la condition AL, la plupart des essais manqués l'ont été en raison de la difficulté de la tâche (*i.e.* la difficulté à parcourir la distance jusqu'à la balle lorsque sa trajectoire était dirigée vers les portes d'arrivée les plus lointaines, dans le temps contraint), tandis que dans les conditions PP et AP, les essais manqués peuvent être attribués à la fois au temps mis pour initier un mouvement (lors des essais manqués, l'initiation de mouvement était souvent trop tardive pour pouvoir intercepter la balle) ainsi qu'à la position d'arrivée de la balle (la plupart des balles manquées l'ont été lorsque leur position finale était proche du centre de la scène).

4.5 Limites et perspectives

Bien que cette étude était l'une des premières à explorer l'utilisation de la réalité virtuelle pour analyser les coordinations et la coopération dans une tâche collective

d'interception de balle, elle comporte plusieurs limites. Premièrement, dans notre condition AL, les balles dont les points d'arrivée étaient les plus éloignées du participant n'étaient pas impossible, mais difficiles à intercepter physiquement, et ces balles étaient ensuite interceptées par le partenaire virtuel fixe (SP) ou réel mobile (PP et AP). Cela s'est traduit, pour la condition AL, en des essais où les participants n'ont pas initié de mouvement d'interception lorsqu'ils jugeaient la balle trop éloignée, car ils ne pensaient pas pouvoir l'intercepter. Ainsi, l'instant de l'initiation de mouvement a pu être influencé par cette absence de mouvement dans ces essais. De plus, l'analyse pour la condition AL a été réalisée via l'utilisation des portes, et le caractère aléatoire des positions de départ et d'arrivée (à l'intérieur d'une même porte) a pu influencer les résultats observés. Nous avons fait le choix de baser notre setup sur celui utilisé par Benerink et al. (2016) ([Benerink2016]). Cependant, il pourrait également être intéressant d'évaluer l'influence du nombre de portes -et avec elles, de points de départ/arrivée aléatoires différents- sur les résultats. Deuxièmement, Gibson disait que "le laboratoire doit être comme la vie" (p. 2) [Gibson1979], et d'aucun pourrait dire que notre setup ne correspond pas strictement à une situation que l'on rencontre dans la vie réelle. Cependant, lorsque nous avons construit notre étude, nous avons essayé de préserver le cycle de perception-action [Craig2013, Farrow2013], en maintenant un engagement physique complet des participants. Ainsi, bien que notre situation ne soit pas parfaitement "comme la vie", son design simple nous a permis d'étudier l'interaction collaborative et la coopération entre deux participants dans une tâche d'interception de balles avec un engagement corporel. Nous sommes cependant conscients que notre setup pourra encore être amélioré pour être plus écologique, mais nous espérons que cette étude consistera la base d'une nouvelle approche dans le champ de l'interaction et de la collaboration en réalité virtuelle, dans une tâche d'interception d'objets mobiles, comme des balles. Troisièmement, une représentation simple de notre avatar a été utilisée ici. Bien que ce choix ait été fait pour étudier uniquement les interactions globales, et limiter les stimulus informationnels de notre situation, il pourrait aussi être intéressant d'étudier l'effet d'une représentation humaine plus réaliste de l'avatar, qui pourrait offrir une représentation plus complète du partenaire. Une représentation plus réaliste pourrait aussi aider à évaluer l'influence de "l'incarnation" dans le monde virtuel [Kilteni2012]. Les prochains travaux pourraient aussi explorer l'influence de différentes vitesses de balles (et donc différentes contraintes temporelles), différents niveaux de réalisme graphique de l'avatar, d'autres axes/plans d'interception (par exemple deux participants côte-à-côte interceptant des balles dans sur un axe médio-latéral), différentes manières d'intercepter la balle (*e.g.* avec la main, le pied, la tête,

etc.), ou encore les patterns de coopérations qui émergent de la tâche lorsque plus de deux participants sont impliqués dans la tâche.

4.6 Conclusion

Dans cette étude, nous avons examiné la façon dont deux personnes coopèrent et comment l'interférence entre elle peut apparaître lors d'une tâche d'interception physique de balles virtuelles, en se basant uniquement sur l'information visuelle disponible. Nos résultats montrent que, lorsqu'ils étaient plongés dans un environnement (3D + affichage stéréoscopique), les participants ont auto-organisé leurs actions et interactions pour décider qui devait intercepter la balle. En effets, ils ont tacitement diviser l'espace d'interception, afin de couvrir chacun environ 50% de l'espace. Cependant, de l'interférence est apparue durant la tâche, et la zone d'incertitude observée est devenue plus important lorsque la complexité de la tâche a augmenté (partenaire qui bouge et/ou informations visuelles disponibles moins importantes). De plus, lorsqu'ils étaient assistés par un partenaire réel, les participants attendaient plus longtemps avant d'initier un mouvement d'interception, et ont été influencés par la position de départ de la balle : une balle qui partait proche de leur position de départ était souvent interprétée comme une balle qu'ils devaient intercepter. Notre étude a donc permis de caractériser cette zone d'incertitude, et de déterminer des facteurs qui influencent sa taille, *i.e.*, son importance. Bien qu'elle utilise une approche simple d'interception collaborative en réalité virtuelle, le design de notre étude a permis aux participants d'être physiquement impliqués dans la tâche, et pourrait servir de base à l'étude de situation plus proches de situations réelles. Ce pourrait être le cas, par exemple, dans beaucoup de sports collectifs où l'interférence apparaît souvent. À cette fin, nous espérons que cette étude apportera de premiers éléments dans une nouvelle approche de l'interaction/coopération en réalité virtuelle. Les projets futurs pourront étudier l'influence de différents paramètres (comme le plan et le mode d'interception, le nombre de participants, ou encore les contraintes temporelles) sur l'interférence entre participants.

5 Coordinations interpersonnelles et interférence lors d'une tâche d'interception - le cas côte-à- côte

Ce chapitre s'attache à étudier la façon dont deux personnes coordonnent leurs actions pour réaliser une tâche commune d'interception de balle côte-à-côte, dans une approche similaire à celle utilisée dans notre première étude (Chapitre 4). À travers l'utilisation d'une salle immersive de réalité virtuelle, cette partie cherche donc à apporter une meilleure compréhension de la mise en place de la coopération entre deux participants, ainsi que l'apparition et l'évolution de l'interférence entre eux. En particulier, nous cherchons à évaluer l'influence du mode d'interception (avec les mains *vs.* avec la tête) sur cette interférence.

Manuscript soumis.

Faure, C., Bideau, B., Limballe, A. and Kulpa, R. (2019) Exploring team cooperation and interference in virtual reality : application to a task of volleyball serve reception. Manuscrit soumis dans la revue Journal of Sports Sciences.

5.1 Introduction

Comme vu précédemment, la coordination d'équipe ne peut pas être réduite à la somme d'habiletés de ses membres [DeChurch2010]. En prenant l'exemple de la réception de service en volley-ball, les partenaires divisent l'espace à couvrir en plusieurs zones [van Opstal2018], une division qui peut être programmée à l'avance mais reste malgré tout sujette à des ajustements entre les individus. Dans le contexte sportif, l'organisation et la communication sont alors essentielles, et les fortes contraintes temporelles limitent les possibilités de communication verbale. Il semble alors important d'analyser et de comprendre la façon dont s'organisent les interactions tacites, afin d'améliorer la coopération et l'efficacité des actions des individus.

De nombreuses études se sont intéressées à la coordination interpersonnelle entre plusieurs participants, et ont montré que les individus étaient capables d'adopter des comportements complémentaires et efficaces pour la réalisation de la tâche commune (voir par exemple [Ganesh2014, Strang2014, Rigoli2015, Benerink2016, van Opstal2018]). Cependant, la reproductibilité d'un geste ou d'une action n'est jamais parfaite chez des joueurs [Franchak2014], et dans des situations sportives temporellement contraintes, la collaboration entre individus résultent parfois en des interceptions inefficaces, en des interférences entre partenaires. Dès lors, ces deux éléments permettent de comprendre comment, lors d'une tâche collective d'interception de balle, la division de l'espace peut être floue. Si plusieurs études se sont intéressées à la façon dont deux individus coordonnent leurs actions, très peu se sont intéressées à la façon dont ils interfèrent, et beaucoup de questions à ce sujet subsistent. Comme expliqué dans ce travail de thèse, nous pensons que l'engagement physique des participants dans la tâche favorise le maintien de la boucle perception-action, lui-même essentiel pour l'analyse de situations proches de situations réelles. Or, à ce jour, très peu d'études ont proposé un engagement physique total des participants dans une tâche collaborative d'interception de balle. Afin d'offrir ces conditions méthodologiques d'étude, nous avons donc basé notre analyse sur des outils de réalité virtuelle, comme précédemment évoqué (Chapitres 1.3.2 et 3).

Il semble par ailleurs que la façon de réaliser l'interception influence la performance de l'individu lors d'une interception de balle (voir par exemple [Zaal2003]). Or, les sports collectifs présentent de nombreuses façons de percevoir l'information (visuelle, haptique, sonore, etc.), et d'agir (mains, tête, pieds, etc.). La question du mode d'interception apparaît alors intéressante, afin de déterminer quels éléments doivent être pris en compte pour réaliser une interception collective efficace. Dans ce travail nous nous intéressons particulièrement à l'interférence entre deux participants, la manière dont elle apparaît et évolue lors d'une tâche de réception de

service en volley-ball ; mais aussi à la façon dont le mode d'interception influence cette performance et cette interférence.

5.2 Matériel et méthodes

5.2.1 Participants

Vingt hommes, droitiers, âgés de $21,1 \pm 1,2$ ans (moyenne \pm écart-type) ont pris part à cette étude. La taille des participants était de $179,7 \pm 3,0$ cm. Les participants étaient inclus si 1) ils étaient droitiers, 2) ils mesuraient entre 1,75 m et 1,85 m, 3) ils pratiquaient au moins une heure d'activité d'intensité modérée à élevée par semaine, 4) ils n'étaient pas joueurs dans une équipe de volley-ball, et 5) ils n'avaient pas été blessés durant les 6 mois précédant l'étude. Aucun des participants n'était blessé au moment de l'étude, et chacun a donné son accord écrit et consenti pour prendre part à l'étude. Aucun d'entre eux n'a ressenti de malaise ou ne s'est blessé durant les expériences. L'étude a été menée dans le respect de la Déclaration d'Helsinki, et les sujets étaient informés de la possibilité de se retirer librement de l'étude à tout moment, sans aucune question ni conséquence, et aucun ne s'est retiré.

5.2.2 Setup expérimental

L'expérience s'est déroulée dans une large CAVE (résolution 1920*1200 pixels, dimensions : $L \times l \times h = 9,6 \times 2,88 \times 3,1$, située dans la salle Immersia de Rennes, comme précédemment définie (voir Chapitre 3 et Figure 20.B). La CAVE comporte 4 écrans de projections (3 murs et un sol). Les images sont projetées sur ces écrans à une fréquence de 120 Hz, via 14 projecteurs Barco F90-4K13, ainsi que des miroirs. Tous les écrans sauf le sol sont projetés par l'arrière. Les participants portaient durant l'expérience des lunettes RF Volfoni EdgeVR qui permettaient, en lien avec les images projetées, un affichage stéréoscopique de la scène. Le suivi des données de positions/orientations des participants est permis via l'utilisation de caméras infrarouge Optitrack (4 caméras Prime13W + 8 caméras Prime13).

La CAVE était suffisamment large pour permettre d'éviter des collisions avec le monde physique et les autres participants. Nous avons ici fait le choix de créer une situation proche d'une situation réelle, c'est-à-dire proche d'une réception de service en volley-ball, afin de proposer un engagement important des individus dans la tâche. L'environnement virtuel consistait en un terrain de volley-ball (dimensions : $L \times l = 18 \times 9$ m). Le filet était placé à une hauteur de 2,43 m, conformément aux règles en vigueur du volley-ball. Afin d'éviter que les participants n'identifient à l'avance la zone de départ de la balle, un large panneau a été placé dans la scène,

à l'endroit où la balle est généralement frappée par le serveur (c'est-à-dire à 18 m des participants, de l'autre côté du terrain). Lorsqu'un essai démarrait, la balle traversait ce panneau. La position de départ de la balle était réglée à une hauteur de 3 m, conformément aux observations de la littérature sur le service en volley-ball [Huang2007]. L'environnement a été construit grâce au logiciel Unity 3D (version 2018.3.1). L'origine O de la scène a été placée au centre du terrain de volley-ball. L'axe X a été défini comme l'axe perpendiculaire à la ligne de fond du terrain et parallèle à la ligne de côté, et orienté du participant vers le centre du terrain. L'axe longitudinal était défini comme l'axe Y et orienté vers le haut, et l'axe Z était perpendiculaire aux axes X et Y, et donc parallèle à la ligne de fond du terrain.

Afin de permettre une bonne perception du mouvement du coéquipier, un algorithme de cinématique inverse a été utilisé pour animer le coéquipier virtuel, et faire correspondre ses positions aux positions réelles, apportant une représentation fidèle de son mouvement. Les participants étaient équipés de dispositifs de tracking sur les mains, les pieds, la tête et le pelvis. En nous basant sur des tests préalables, nous avons identifié cet équipement comme le plus simple que nous pouvions utiliser pour obtenir de bonnes performances visuelles sur l'animation et le comportement de l'avatar. Les mouvements étaient appliqués sur un modèle 3D d'homme, afin que chaque participant puisse voir les actions de son coéquipier dans le monde virtuel. Les individus voyaient donc leur corps réel et l'avatar de leur partenaire. Les participants pouvaient évoluer librement dans la scène. Chaque participant était aléatoirement assigné à un côté de la CAVE (gauche ou droit), et le setup était ajusté afin qu'une collision virtuelle soit possible, mais pas une collision réelle. Comme précédemment décrit, le serveur collectait les informations émanant de chaque individu, et renvoyait les informations correspondantes et pertinentes (c'est-à-dire l'état actuel de la scène en fonction du point de vue, la position de la balle et du partenaire, etc.).

Finalement, afin d'évaluer l'expérience des participants avec l'environnement virtuel, ainsi que leur sensation de *présence*, nous avons collecté des questionnaires subjectifs (en utilisant une notation sur l'échelle de Likert à 7 points) avant et après l'expérience.

5.2.3 Tâche

L'expérience a consisté en 4 sessions consécutives, durant lesquelles les participants devaient intercepter des balles avec la tête ou les mains. Dans la première session, le participant interceptait les balles individuellement, avec la tête (cette condition sera maintenant notée HeA, pour HeadAlone). Dans la seconde condition, le participant interceptait les balles seul, avec les mains (cette condition sera

maintenant notée HaA, pour HandsAlone). Dans la troisième condition, les participants ont réalisé l'interception par équipes de deux, avec la tête (cette condition sera maintenant notée HeC, pour HeadCouple). Enfin, dans la quatrième condition, ils interceptaient la balle collectivement, avec les mains (cette condition sera maintenant notée HaC, pour HandsCouple). Les participants étaient informés que, dans les conditions 3 et 4, seul comptait le score d'interception global, et pas le score individuel. Cela signifie qu'ils devaient intercepter collectivement les balles, et sans collision entre eux. Les 4 sessions étaient réalisées dans un ordre aléatoire.

Comme expliqué précédemment, lorsque les participants réalisaient la tâche avec un partenaire (c'est-à-dire dans les conditions HeC et HaC), ils pouvaient voir son avatar bouger. Afin d'assurer un haut niveau d'incarnation des participants, nous avons fait le choix d'utiliser des avatars réalistes [Fribourg2018], et une grande attention a été portée à la qualité de l'animation de l'avatar (c'est-à-dire la façon dont l'avatar bouge en accord avec les mouvements réels de l'individu). Pour toutes les conditions, la position de départ des participants était située sur la ligne de fond du terrain, du côté opposé au départ des balles. Lorsque deux individus étaient présents, ils commençaient les essais à une distance initiale de 2 m l'un de l'autre. Cela signifie que, pour les conditions HeC et HaC, ils étaient placés côte-à-côte sur la ligne de fond, et séparés de 2 m. Du point de vue de l'observateur externe qui regarde la CAVE, le participant situé à droite était considéré comme le participant P_1 , et le participant situé à gauche comme le participant P_2 . Les participants ont réalisé la tâche du même côté lorsqu'ils étaient seuls (HeA et HaA) et lorsqu'ils étaient assistés d'un partenaire (HeC et HaC).

5.2.4 Procédure

À leur arrivée, les participants lisaient et signaient le formulaire d'information et de consentement éclairé.

Lorsqu'ils étaient placés dans l'environnement virtuel, les participants devaient intercepter des balles virtuelles se déplaçant du panneau virtuel vers eux, avec une trajectoire linéaire. La balle n'était pas visible avant le départ de l'essai, afin que les participants ne puissent pas savoir où serait sa position de départ. Avant chaque essai, les participants devaient se rendre à leur position de départ, matérialisée par deux empreintes de pas, sur la ligne de fond (-1 m et +1 m par rapport au centre de la scène, sur l'axe Z). Lorsque les participants étaient prêts, un expérimentateur déclenchait l'essai. D'une façon similaire à un service en volley-ball, la balle commençait à se déplacer avec une vitesse de $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, donnant lieu à des essais où les individus disposaient d'environ 1,1 s pour intercepter la balle, ce qui correspond aux observa-

tions faites sur les caractéristiques du service en volley-ball [Benerink2015]. De plus, comme la perception des trajectoires est meilleure avec une balle aux contrastes de couleurs importants comparé à une balle blanche [Lenoir2005], une balle virtuelle de couleur bleu-jaune-blanc (circonférence : 65 cm) a été créée et utilisée pour notre étude, de la même manière que précédemment (voir Chapitre 4).

En nous basant sur les protocoles issus de la littérature [Benerink2016, Benerink2018, van Opstal2018], de même que notre première étude (Chapitre 4), les trajectoires de balle ont été construites avec l'utilisation de 5 points de départ (hauteur : 3 m), et 5 points d'arrivée (hauteur : 1,7 m). Les points de départ, tout comme les points d'arrivée, étaient séparés de 1 m (situés en $Z = -2, -1, 0, +1$ et $+2$ m). La combinaison de ces points de départ et d'arrivée donnait lieu à la construction de 25 trajectoires par condition. Ceci implique que les individus ont réalisés 25 essais en HeA, et 25 essais en HaA. Il est important de souligner que, dans les conditions HeC et HaC, les participants réalisaient l'interception par équipes de deux individus. Chaque équipe (c'est-à-dire 2 participants réalisant la tâche ensemble) a donc réalisé 25 essais en HeC, et 25 essais en HaC. La figure 33 offre alors une représentation simple de la procédure de l'expérimentation, de la même manière que durant notre première étude.

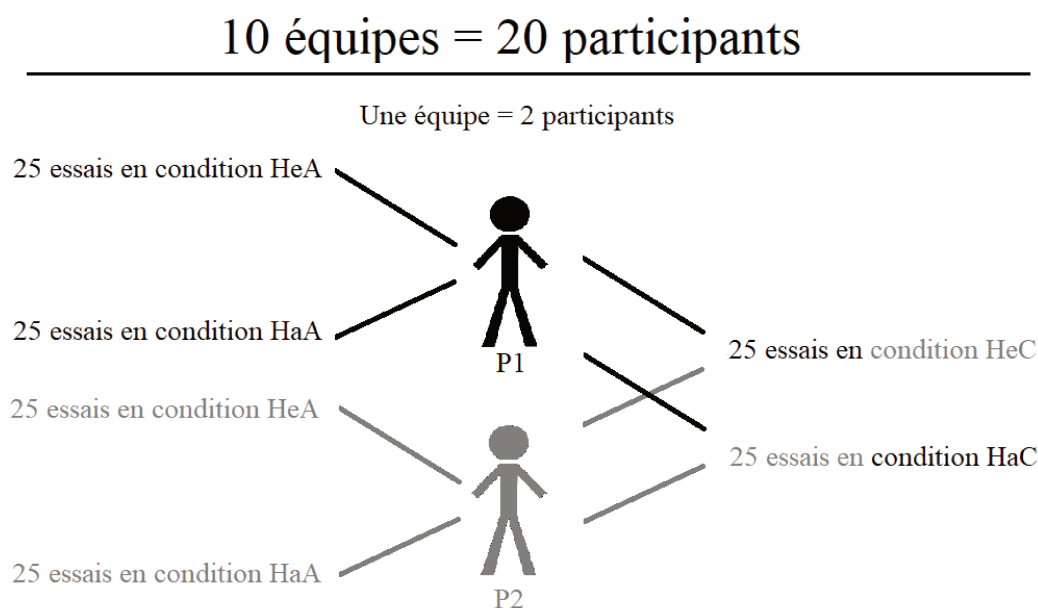


FIGURE 33 – **Représentation schématique du déroulement de l'expérience.** Chaque participant réalisait 25 essais dans la condition HeA, et 25 essais dans la condition HaA. Chaque équipe (de deux participants) réalisait 25 essais dans la condition HeA, et 25 essais dans la condition HaC.

De plus, afin d'éviter une familiarisation avec les points de départ et d'arrivée,

une distance aléatoire comprise entre $-0,5$ et $+0,5$ m a été ajoutée à la position de départ et d'arrivée de la balle, pour chaque essai. Ainsi, la balle pouvait apparaître n'importe où sur le panneau, et arriver n'importe où dans l'aire d'arrivée, sans changement dans l'angle de la trajectoire. Les points de départ et d'arrivée étaient invisibles pour les participants.

Avant le début des expériences, il était demandé aux participants de se déplacer librement dans l'environnement virtuel, et également de réaliser 10 essais dans chacune des 4 conditions, afin de se familiariser avec l'environnement virtuel et la tâche. Lorsqu'ils étaient assistés d'un partenaire, ils devaient également rentrer volontairement en collision avec lui (dans l'environnement virtuel), afin de voir et comprendre que ceci était considéré comme une collision et un essai manqué. Aucun de ces essais de familiarisation n'était enregistré. Afin d'éviter des phénomènes de fatigue (liée à l'expérience ou à l'utilisation prolongée de système de RV), une période de repos (5 minutes minimum) était donnée aux participants entre chaque condition.

Un essai était considéré comme réussi lorsque la balle était interceptée avec la tête ou les mains, selon la condition. Un essai était considéré comme manqué lorsque aucun des participants n'interceptait la balle, ou lorsque qu'une collision entre eux se produisait. Si la balle était interceptée mais qu'une collision survenait après, l'essai était considéré comme manqué. Un message visuel était affiché sur le panneau à la fin de chaque essai pour indiquer aux participants leur réussite ou non. Lorsqu'une collision se produisait, les participants en étaient clairement informés. À la fin de chaque essai, les participants retournaient à leur point de départ, et l'expérimentateur lançait un nouvel essai. Pour les conditions HeC et HaC, c'est-à-dire les conditions d'équipe, aucune communication verbale n'était autorisée avant ou durant l'expérience. Ce choix d'éliminer la communication verbale a été fait afin que les participants se concentrent uniquement sur les mouvements du partenaire et de la balle pour décider s'ils devaient ou non intercepter la balle.

Finalement, à la fin de l'expérience, les participants répondaient au questionnaire. Le questionnaire était inspiré de travaux précédents (voir par exemple [Slater1998, Usoh2000, Lynch2018, Fribourg2018]), et utilisé afin d'évaluer l'expérience immersive des participants. Pour chacune des questions, il leur était demandé d'évaluer leur réponse sur une échelle de Likert à 7 points.

5.2.5 Variables dépendantes et analyse

Les déplacements de la tête, du pelvis, des pieds et des mains des participants étaient enregistrés via le système de capture de mouvement. Comme les dimensions de l'environnement virtuel étaient construites pour correspondre aux dimensions de

l'environnement réel, le déplacement des participants était similaire dans les deux environnements.

Le score d'interception était calculé comme le pourcentage de balles interceptées parmi l'ensemble des essais, pour chacune des conditions. Le nombre et la position des collisions pour chaque condition étaient enregistrés.

Pour étudier comment était réalisée l'interception globale par les équipes dans les conditions HeC et HaC, nous avons comme précédemment utilisé une fonction logit [Hosmer2000], et affiché la courbe de régression linéaire représentant la probabilité que P_1 ($P = 1$) ou P_2 ($P = 0$) intercepte la balle, en fonction de la position d'arrivée de la balle. Comme expliqué dans l'étude précédente, si la séparation était complète, la probabilité P devrait être égale à 1 pour toutes les balles interceptées par P_1 , et égale à 0 partout ailleurs. L'utilisation du MEL (Median Effective Level) et de *l'overlap* ont, ici aussi, permis de quantifier mathématiquement l'écart existant entre les frontières théorique et réelle d'interception, entre les deux participants. Ce choix méthodologique permet d'adopter une approche similaire aux travaux préalablement menés dans la littérature [Benerink2016, Benerink2018], et dans cette thèse (Chapitre 4).

Durant un essai, l'initiation de mouvement était définie comme le premier instant où la main (conditions HaA et HaC) ou la tête (conditions HeA et HeC) des participants a atteint une vitesse de $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ avec un déplacement minimal de 10 cm sur l'axe Z. De plus, lorsque la balle était interceptée, la position de l'interception était relevée. Lorsqu'elle ne l'était pas, la position finale de la balle (lors du croisement avec l'axe d'interception) était enregistrée.

Pour chaque essai, nous avons calculé le *bearing angle* θ (voir Chapitre 1.1.2.1 et Figure 7 au cours du temps, et étudié son évolution au cours du temps. Maintenir θ constant au court du temps (c'est-à-dire maintenir $d\theta/dt$ le plus proche possible de 0) permet d'adopter une stratégie de poursuite viable, car elle entraîne un participant à continuellement suivre la balle et l'intercepter lorsqu'elle croise son propre axe de déplacement (dans notre cas, la ligne de fond du terrain de volley-ball). Ainsi, nous avons cherché à savoir si ce paramètre était ou non différent lors des essais manqués comparés aux essais interceptés, lorsque la performance était réalisée seule ou à deux, et avec les mains ou avec la tête.

Le traitement des résultats, l'analyse des variables et les statistiques ont été effectués avec le logiciel R [RCORE-TEAM2016]. Le niveau de significativité a été fixé à 0,05. La normalité des données a été testée avec un test de Shapiro-Wilk. La taille d'effet a été calculée pour évaluer la force des effets statistiques observés, en s'appuyant sur les eta-carré partiels (η_p^2) pour les ANOVA (ANALYSIS OF VARIANCE)

(mesure via l'échelle de Cohen ; petit effet : $0,01 < \eta_p^2 < 0,06$, effet moyen : $0,06 < \eta_p^2 < 0,14$, et large effet : $\eta_p^2 > 0,14$), et le d de Cohen pour les comparaisons deux à deux (mesure via l'échelle de Cohen ; petit effet : $0,2 < d < 0,5$, effet moyen : $0,5 < d < 0,8$, et large effet : $d > 0,8$).

5.3 Résultats

5.3.1 Questionnaires

Afin d'évaluer l'expérience des participants dans l'environnement virtuel, de même que leur *présence*, il leur était demandé de remplir des questionnaires subjectifs avant et après les expérimentations. Tout d'abord, aucun d'entre eux n'a reporté de problème particulier (mal de la réalité virtuelle, vertige, etc.). Ensuite, les résultats ont montré que malgré leur faible expérience des environnements virtuels ($1,9 \pm 1,5$ sur l'échelle de Likert), ils avaient une bonne sensation d'être présent dans l'environnement ($5,0 \pm 1,1$), ont souvent trouvé que l'environnement représentait la réalité ($4,6 \pm 1,4$), et ont trouvé que la tâche réalisée n'était pas différente d'une tâche réelle ($6,1 \pm 0,9$). Finalement, ils ont trouvé l'expérience intéressante ($6,4 \pm 0,6$), confortable ($5,6 \pm 1,0$) et peu fatigante ($6,5 \pm 0,6$).

5.3.2 Interceptions et collisions

Le score d'interception globale a été calculé pour chaque condition (voir Tableau 3). Lorsqu'ils étaient seuls, les participants ont intercepté $48,8 \pm 8,4$ % des balles lors de l'interception avec la tête (HeA), et $54,4 \pm 6,6$ % des balles lors de l'interception avec les mains (HaA). Lorsqu'ils étaient deux, ils ont intercepté $71,6 \pm 10,4$ % des balles lors de l'interception avec la tête (HeC), et $87,6 \pm 8,9$ % des balles lors de l'interception avec les mains (HaC). Le test non paramétriques de Kruskal-Wallis réalisé a révélé un effet significatif de la condition sur la performance [$\chi^2 = 44,8$, $df = 3$, $p < 0,001$], et le test sur les rangs de Wilcoxon (correction de Bonferroni) a montré que la performance était significativement plus faible lorsque un seul participant réalisait la tâche comparé à deux participants, pour les interceptions avec la tête [HeA *vs.* HeC, $d > 0,8$, $p < 0,001$] et avec les mains [HaA *vs.* HaC, $d > 0,8$, $p < 0,001$]. De la même manière, la performance était meilleure lorsque les participants ont intercepté la balle avec les mains plutôt qu'avec la tête, lorsqu'ils étaient seuls [HeA *vs.* HaA, $d > 0,8$, $p < 0,001$] ou en équipe de deux [HeC *vs.* HaC, $d > 0,8$, $p < 0,05$].

Les collisions avec le partenaire ont été très rares (voir Tableau 3), que la performance ait été réalisée avec la tête (HeC, une seule collision) ou avec les mains (HaC,

deux collisions), mettant en avant la capacité des individus à réaliser la tâche tout en évitant les collisions avec leur partenaire.

TABLE 3 – Scores globaux d'interception et de collisions

††† : significativement différent de HeA ($p < 0,001$)

*** : significativement différent de HaA ($p < 0,001$)

£ : significativement différent de HeC ($p < 0,05$)

Condition	Score global d'interception (% \pm ET)	Collisions (nombre et % des essais)
Condition HeA	48,8 \pm 8,4	-
Condition HaA	54,4 \pm 6,6 †††	-
Condition HeC	71,6 \pm 10,4 †††***	1 (0,4%)
Condition HaC	87,6 \pm 8,9 †††*** £	2 (0,8%)

5.3.3 Pattern d'interception collective et zone d'incertitude

Afin d'examiner un potentiel effet du côté sur la performance dans les conditions HeC et HaC, c'est-à-dire une éventuelle différence de performance entre les participants situés à droite (P_1) et à gauche (P_2), nous avons réalisé une ANOVA à deux voies sur le score d'interception avec le côté (P_1 et P_2) comme facteur interpersonnel, et la condition (HaC et HeC) comme facteur intrapersonnel. Aucune différence n'a été trouvée dans les deux conditions [$\eta_p^2 = 0,03$, $p = 0,17$].

Afin d'identifier la façon dont était divisée la tâche d'interception entre les participants dans HeC et HaC, nous avons analysé le score d'interception comme fonction de la position d'arrivée de la balle (voir Figures 34 et 35). Les interceptions réalisées par les participants de droite (resp. gauche) sont représentées par des points vert (resp. bleu). De manière similaire, nous avons représenté les points d'arrivée des balles manquées en jaune, et les lieux de collisions en rouge. Tout d'abord, lorsque les balles n'étaient pas interceptées ou lorsqu'une collision survenait, la position finale de la balle était souvent proche du centre de l'espace d'interception (c'est-à-dire dans ce que nous appelons la zone d'incertitude), dans les conditions HeC et HaC (position finale moyenne des balles manquées : $-0,04 \pm 0,79$ m, et $-0,09 \pm 0,59$ m, respectivement). Cela suggère que les participants ont été capables de réaliser la tâche efficacement (haut score d'interception), mais que la performance était moins bonne lorsque la balle arrivait dans cette zone, comme précédemment observé dans la littérature (voir par exemple [Benerink2016, Benerink2018, van Opstal2018] ou le Chapitre 4 de cette thèse). Deuxièmement, dans la condition HeC, les participants ont aussi manqué plusieurs essais hors de cette zone, ce qui était rare dans la condition HaC. Ce résultat est directement observable sur les figures 34 et 35, ainsi que

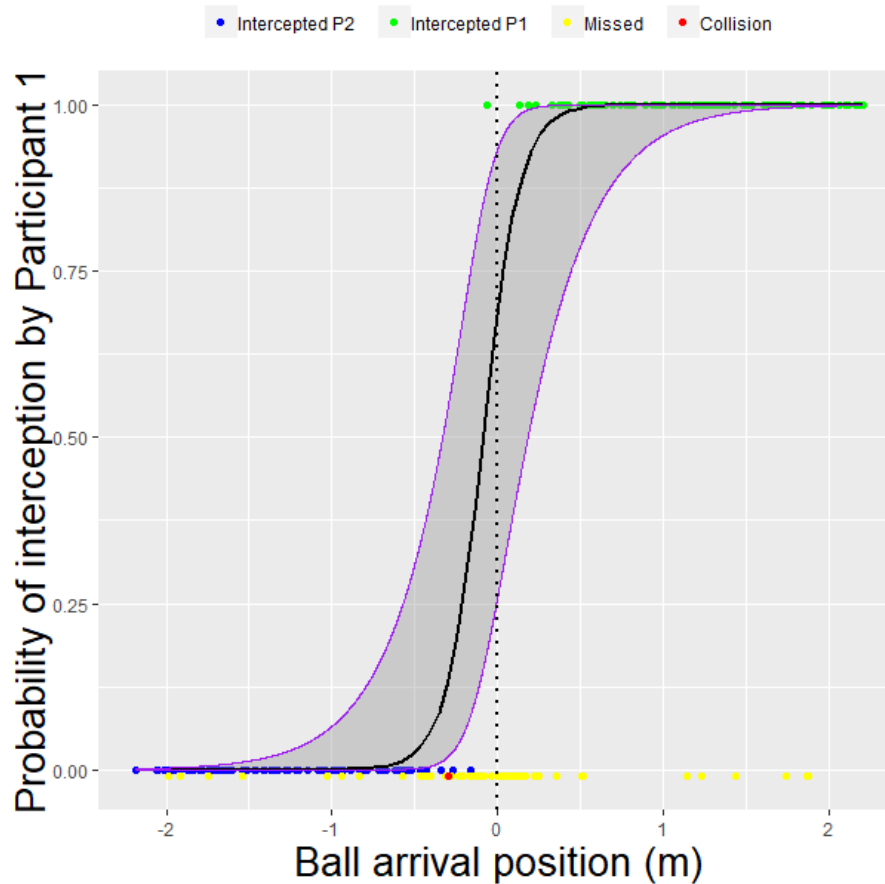


FIGURE 34 – Résumé graphique de la performance d'interception de balle comme fonction de la position d'arrivée de la balle (Condition HeC). Les points verts représentent les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 1, et les points bleus les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 2. Les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles lors des essais manqués sont indiquées par les points jaunes (essais non-interceptés) et les points rouges (collisions). La ligne pointillée verticale noire indique le centre de l'axe X d'interception. La courbe noire représente la courbe de régression logistique relative à la probabilité que P_1 ($P = 1$) ou P_2 ($P = 0$) intercepte la balle, comme fonction de la position finale de la balle. Les courbes violettes représentent l'intervalle de confiance à 95%.

sur l'écart-type plus important pour HeC que HaC, lors des essais manqués. Enfin, peu d'interceptions ont été réalisées dans cette zone d'incertitude, en particulier dans la condition HeC. Pour aller plus loin dans cette analyse, nous avons regardé le MEL et *l'overlap*, afin de quantifier mathématiquement ce pattern d'interception collective. Nous avons trouvé dans la condition HeC un MEL de 6,2 cm et un *overlap* de 66,2 cm, et dans la condition HaC, un MEL de -8,8 cm et un *overlap* de 36,6 cm. Cela signifie que dans cette zone (large de 66,2 cm ou 36,6 cm selon la condition),

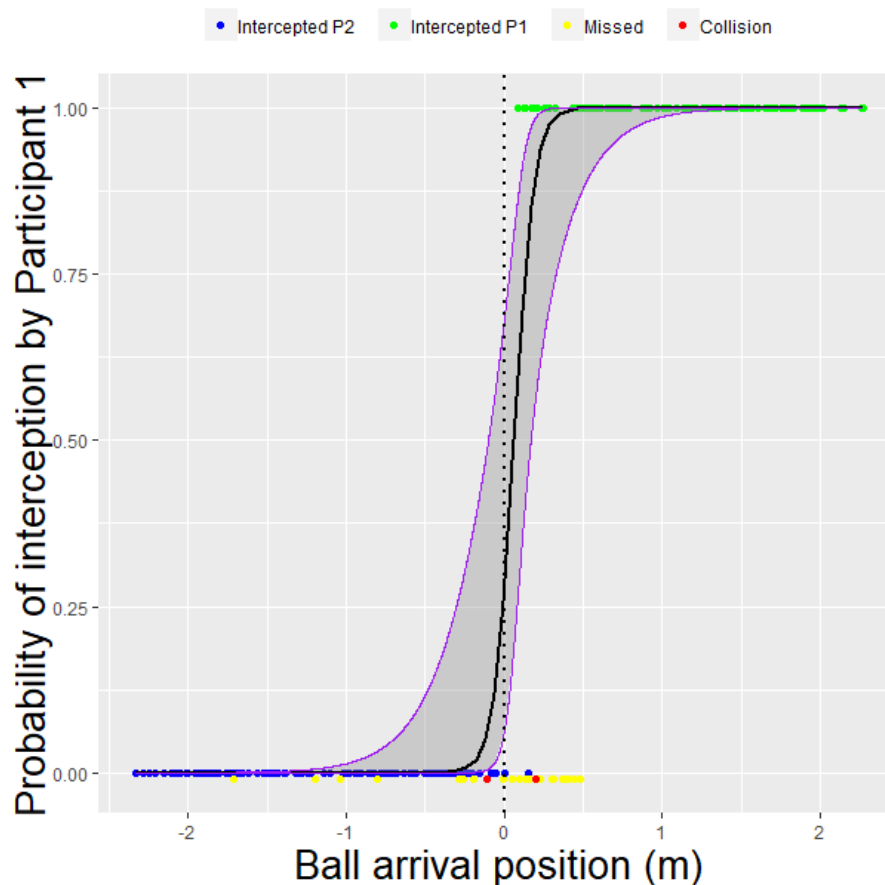


FIGURE 35 – **Résumé graphique de la performance d'interception de balle comme fonction de la position d'arrivée de la balle (Condition HaC).** Les points verts représentent les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 1, et les points bleus les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 2. Les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles lors des essais manqués sont indiquées par les points jaunes (essais non-interceptés) et les points rouges (collisions). La ligne pointillée verticale noire indique le centre de l'axe X d'interception. La courbe noire représente la courbe de régression logistique relative à la probabilité que P_1 ($P = 1$) ou P_2 ($P = 0$) intercepte la balle, comme fonction de la position finale de la balle. Les courbes violettes représentent l'intervalle de confiance à 95%.

les participants ont eu des difficultés à juger s'ils devaient intercepter la balle ou la laisser à leur partenaire, mettant en lumière une division floue de l'espace.

5.3.4 Cinématique du mouvement d'interception

Afin d'étudier l'influence des conditions sur la cinématique de l'interception, nous avons regardé le moment moyen d'initiation de mouvement pour chaque condition. Le tableau 4 indique que le mouvement a été initié plus tard lorsque deux participants

ont réalisé la tâche. Une ANOVA à mesures répétées a montré une influence de la condition sur le moment d'initiation de mouvement pour l'ensemble des essais [$\eta_p^2 = 0,15$, $p < 0,001$], pour les essais interceptés [$\eta_p^2 = 0,14$, $p < 0,001$], et pour les essais manqués [$\eta_p^2 = 0,07$, $p < 0,001$]. Le test post-hoc HSD de Tukey a confirmé ces observations, avec des temps d'initiation de mouvement significativement plus grands dans les conditions HeC et HaC comparé aux conditions HeA et HaA (tous les $p < 0,001$). Cependant, nous n'avons trouvé aucune différence entre les essais interceptés et les essais manqués, pour aucune des conditions, mettant en avant le fait que l'initiation de mouvement n'était pas un facteur pouvant expliquer l'issue de l'essai (c'est-à-dire, réussi ou manqué). De manière intéressante, il n'existait pas d'influence de mode d'interception (avec la tête *vs.* avec les mains) sur le temps d'initiation de mouvement, ni pour les situations où les individus étaient seuls (HeA *vs.* HaA), ni pour celles où ils agissaient collectivement (HeC *vs.* HaC).

TABLE 4 – Moyenne du temps d'initiation de mouvement des participants pour toutes les conditions : pour l'ensemble des essais, pour les essais interceptés uniquement, et pour les essais manqués uniquement

††† : significativement différent de HeA ($p < 0,001$)

*** : significativement différent de HaA ($p < 0,001$)

<i>Condition</i>	<i>Moyenne du temps d'initiation de mouvement pour l'ensemble des essais (en ms, M ± ET)</i>	<i>Moyenne du temps d'initiation de mouvement pour les essais interceptés (en ms, M ± ET)</i>	<i>Moyenne du temps d'initiation de mouvement pour les essais manqués (en ms, M ± ET)</i>
<i>Condition HeA</i>	442 ± 103	441 ± 98	442 ± 107
<i>Condition HaA</i>	441 ± 94	454 ± 89	425 ± 98
<i>Condition HeC</i>	489 ± 101 ††† ***	484 ± 97 ††† ***	489 ± 114 ††† ***
<i>Condition HaC</i>	492 ± 106 ††† ***	493 ± 101 ††† ***	516 ± 137 ††† ***

Enfin, nous avons cherché à savoir si l'évolution du *bearing angle* θ était différente selon les conditions : essais interceptés *vs.* manqués, interception réalisée avec la tête *vs.* avec les mains, un participant *vs.* deux participants réalise(nt) l'interception. Le tableau 5 montre de grandes différences dans l'évolution de θ au cours du temps entre les essais réussis et les essais manqués, pour toutes les conditions. Un test non-paramétrique de Wilcoxon a confirmé ces observations [tous les $p < 0,001$, $d > 0,8$ pour HeA et HaA, $d = 0,5$ pour HeC, et $d = 0,4$ pour HaC]. Cependant, il n'a pas été observé d'influence du mode d'interception (mains *vs.* tête) sur l'évolution de θ , pour aucune condition. Enfin, nous avons trouvé une influence significative du

nombre de participants lorsque l'interception était réalisée avec les mains (HaA *vs.* HaC), uniquement pour les essais interceptés [test de Wilcoxon, $d = 0,3$, $p < 0,05$].

TABLE 5 – **Évolution moyenne de l'angle θ , pour les essais réussis et les essais manqués**

††† : significativement différent des essais réussis pour la même condition ($p < 0,001$)
* : significativement différent de HaA pour les essais réussi ($p < 0,05$)

<i>Condition</i>	<i>Évolution moyenne de θ pour les essais réussis (rad/sec \pm ET)</i>	<i>Évolution moyenne de θ pour les essais manqués (rad/sec \pm ET)</i>
<i>Condition HeA</i>	$0,13 \pm 0,37$	$0,91 \pm 0,57$ †††
<i>Condition HaA</i>	$0,17 \pm 0,44$	$0,85 \pm 0,43$ †††
<i>Condition HeC</i>	$0,17 \pm 0,54$	$0,48 \pm 2,99$ †††
<i>Condition HaC</i>	$0,40 \pm 0,43$ *	$1,07 \pm 2,96$ †††

5.4 Discussion

5.4.1 Questionnaires

Les résultats des questionnaires ont offert d'intéressantes observations concernant l'expérience immersive des participants. Par exemple, les participants avaient pour la plupart une faible expérience de la réalité virtuelle, mais ont malgré tout réalisé de bonnes performances dans la tâche. De plus, ils ont expérimenté un bon sens de *présence*, et ont trouvé que la tâche virtuelle réalisée n'était pas différente d'une tâche réelle. Covaci et al. (2015) ont expliqué que, dans leur étude sur le lancer-franc, beaucoup de participants ont souligné qu'il avait été difficile de se familiariser avec l'entraînement en réalité virtuelle [Covaci2015], et les auteurs ont suggéré qu'un manque de temps alloué à la familiarisation pouvait expliquer ces observations. Au regard de nos propres résultats, il semble que la période de familiarisation offerte aux sujets était suffisante pour contrebalancer leur manque d'expérience des technologies immersives. L'expérience positive des participants (expérience intéressante, confortable et peu fatigante selon eux) nous laisse penser que le niveau d'intérêt et d'engagement des participants était important, et que notre tâche était assez proche d'une situation réelle (comme souligné par les participants).

5.4.2 Interceptions et collisions

La performance d'interception des participants était bonne dans notre étude, en particulier dans les situations où ils ont intercepté la balle en tant qu'équipe,

comme précédemment observé dans d'autres travaux (voir Chapitre 4, ou également les travaux menés à l'ISM d'Aix-Marseille Université [[Benerink2016](#), [Benerink2018](#), [van Opstal2018](#)]). Ceci est parfaitement logique dans la mesure où notre situation était réalisée sous de fortes contraintes temporelles, et donc, permettait une couverture de l'espace d'interception plus grande pour une équipe que pour un individu seul. Plus intéressant, les performances étaient meilleures lorsque l'interception était réalisée avec les mains plutôt qu'avec la tête. Ce résultat n'est pas en accord avec les observations faites par [[Zaal2003](#)], et pourrait être due à plusieurs raisons. Premièrement, les importantes évolutions des technologies de réalité virtuelle ont grandement amélioré la qualité des expériences virtuelles, et des études plus récentes menées sur l'interception manuelle de balles virtuelles ont trouvé de bonnes performances des participants (voir par exemple [[Dessing2010](#), [Craig2011](#), [Vignais2015](#)]). Deuxièmement, la familiarisation dans notre étude semble avoir été suffisante pour offrir une bonne immersive virtuelle des participants, et pourrait être l'une des raisons pour lesquelles les participants ont été parfaitement capables de percevoir les trajectoires et se déplacer dans l'environnement virtuel. Finalement, Zaal et Michaels (2003) ont émis l'idée que les meilleurs résultats observés dans leur étude lors de l'interception avec la tête étaient dus à la présence d'un feedback (visuel) pour aider les participants à améliorer leurs performances. Nous sommes parfaitement d'accord avec cette idée de l'importance du feedback, car lors de l'interception avec les mains, les participants de Zaal et Michaels ne recevaient aucun feedback sur leur action. Dans notre étude, le setup a été construit différemment. En effet, à la fin de chaque essai, au moins deux feedbacks étaient fournis dans notre étude, que l'interception soit réalisée avec la tête ou les mains : lorsque la balle était interceptée, les lois physiques étaient appliquées à la balle, et dès lors, elle pouvait rebondir et changer de direction comme si elle avait été réellement touchée par le participant. De plus, après chaque essai, un message visuel était affiché pour informer les participants de la réussite ou non de l'essai. Ainsi, nous avons fourni des feedbacks visuels après chaque essai, et les participants pouvaient alors adapter rapidement et efficacement leur mouvement d'interception, dès la période de familiarisation. De manière intéressante, de meilleures performances lors d'interception avec les mains étaient observées lorsque les individus étaient seuls, mais également lorsqu'ils étaient en équipes de deux. Cela signifie que malgré des contraintes temporelles moins importantes lorsqu'ils étaient deux (dus à de plus faibles distances à couvrir pour chaque participant), l'interception était toujours plus difficile avec la tête qu'avec les mains. Cela pourrait être dû au fait que, lors d'une réception de service en volley-ball, les mouvements du corps total et ceux des bras reposent sur des processus de contrôles différents [[Benerink2015](#)] :

les mouvements des bras commencent après le mouvement global du corps, et les mains sont souvent utilisées pour des actions d'interception rapide (grâce à une faible masse et une grande liberté de mouvements des membres supérieurs). Ainsi, les contraintes temporelles de notre situation peuvent expliquer l'utilisation efficace des bras comparés à la tête lors de l'interception de balle.

Les collisions dans notre étude ont été très rares, avec seulement 3 collisions sur un total de 500 essais réalisés par les équipes. Cela signifie que les participants étaient capables de réaliser la tâche efficacement tout en évitant les collisions, en coordonnant leurs actions entre eux, conformément aux observations de la littérature [Benerink2016, Benerink2018, van Opstal2018, Faure2019]. Les scores étaient même meilleurs dans la présente étude, ce qui pourrait être notamment dû au plus haut degré de réalisme proposé par notre situation.

5.4.3 Pattern d'interception collective et zone d'incertitude

Dans les conditions HeC et HaC, la division de l'espace était plutôt bien définie, avec les participants situés à gauche (resp. à droite) interceptant la majorité des balles arrivant dans la moitié gauche (resp. à droite) du court de volley-ball (Figures 34 et 35). De plus, la plupart des essais manqués l'ont été pour les balles arrivant proche du centre de l'espace d'interception, c'est-à-dire proche de la zone d'incertitude. Cette observation est en accord avec le constat selon lequel l'espace d'interception est plutôt bien divisé entre les participants, mais la frontière réelle entre les deux espaces reste variable [van Opstal2018]. De plus, dans les conditions HeC et HaC, les participants devaient théoriquement couvrir un espace plus large sur leur côté extérieur que leur côté intérieur (1,5 m *vs.* 1 m, voir partie Matériels et Méthodes). Cela signifie que les participants à gauche (resp. à droite) de la CAVE devraient globalement avoir de meilleurs scores d'interception pour les balles arrivant à leur droite (resp. à leur gauche), du fait d'une distance à couvrir plus petite de ce côté. Forts de ces observations, il semble que la coopération dans la zone "intérieur" a été fortement perturbée dans notre étude (*i.e.* performance moins bonne du côté "intérieur"), menant ainsi à l'apparition de la zone d'incertitude et à une frontière imprécise entre les espaces d'interception. De plus, dans la condition HeC, plusieurs essais hors de la zone d'incertitude n'ont pas été interceptés. Comme cette observation n'était que très sporadique dans la condition HaC, nous ne pouvons pas attribuer cette observation à des problèmes globaux de jugement de trajectoires de balles, ce qui est par ailleurs appuyé par la littérature ayant montré les bonnes capacités de sujets dans le jugement de trajectoire de balle rectiligne en réalité virtuelle (voir par exemple [Craig2006, Craig2009, Bootsma2016]). Une autre expli-

cation pourrait résider dans la contrainte temporelle de la tâche : en effet, comme expliqué précédemment, les mouvements des mains sont souvent impliqués pour les actions d'interception rapide, et dès lors, offrent un moyen efficace d'intercepter une balle. Avec ceci, un résultat intéressant à souligner est que, dans la condition HeC, seuls quelques essais ont été interceptés dans la zone d'incertitude, ce qui, une fois encore, n'était pas le cas dans la condition HaC. Nous pouvons expliquer ceci en signalant que, comme les participants devaient éviter les collisions (virtuelles) entre eux, ils ont dû être plus prudents dans leurs mouvements dans la condition HeC. En effet, l'interception avec la tête dans la zone d'incertitude implique la nécessité d'une mise en mouvement du corps total, tandis que l'interception avec les mains peut être réalisée avec une implication moindre du corps entier. Ainsi, il est plus facile d'éviter une collision proche lors d'une interception avec les mains comparée à une interception avec la tête.

Afin de quantifier plus précisément l'influence des conditions sur la zone d'incertitude, nous avons utilisé le concept *d'overlap*, comme précédemment défini. Une observation importante est que cet *overlap* était presque deux fois plus grand dans la condition HeC par rapport à la condition HaC (66,2 cm *vs.* 36,6 cm, respectivement). C'est un point particulièrement intéressant, car il confirme les observations précédemment faites sur l'efficacité d'interception : l'interférence entre les partenaires était plus importante lors de l'interception avec la tête comparée aux mains.

5.4.4 Cinématique du mouvement d'interception

Tout d'abord, nous avons trouvé que l'initiation de mouvement était plus tardive lorsque deux individus réalisaient la tâche, pour l'ensemble des essais, mais aussi pour les essais interceptés, et les essais manqués uniquement. Ceci est en accord avec les observations de la littérature. Par exemple, Richardson et al. (2015), dans une tâche interpersonnelle d'évitement de collision, ont observé l'apparition d'une phase de retard [Richardson2015]. De plus, lorsque la tâche est réalisée avec un partenaire, la complexité de la situation augmente, car les individus doivent concomitamment gérer les informations venant de la balle et du partenaire. Le temps de réaction était dépendant de la complexité de la tâche [Darbutas2013], nos observations semblent donc logiques. De façon intéressante, nous n'avons pas observé d'influence du temps d'initiation de mouvement sur le résultat de l'essai (c'est-à-dire que l'initiation de mouvement n'était pas meilleure lors des essais réussis, comparés aux essais manqués). Cela suggère que lorsque les individus ont manqué la balle, ce n'était pas à cause d'une initiation de mouvement tardive, mais pourrait plutôt être dû à une erreur de jugement de la position finale, et de la décision de qui devait intercepter

la balle. Plus remarquable, il n'y avait pas d'influence du mode d'interception sur le temps d'initiation de mouvement, que les individus soient seuls (HeA et HaA) ou à deux (HeC et HaC). Cela peut paraître surprenant, car comme l'interception était plus facile à réaliser avec les mains, nous aurions pu nous attendre à ce que les individus attendent plus longtemps avant d'engager un mouvement d'interception, afin de relever plus d'informations sur la situation et son évolution. Cela pourrait être lié aux fortes contraintes temporelles de la situation, les participants pensant qu'ils devaient réagir le plus vite possible, quel que soit le mode d'interception, pour parvenir à réaliser la tâche.

Enfin, nous avons cherché à savoir si la théorie du *constant bearing angle* pouvait permettre d'initier une stratégie de poursuite viable, dans une situation impliquant des mouvements complets du corps. Nous avons trouvé une prédiction consistante de cette évolution/variation de θ sur l'issue de la situation, avec une fluctuation beaucoup plus faible lorsque la balle était *in fine* interceptée, ce qui est en accord avec les prédictions et observations précédemment faites. De plus, il n'y pas avait d'influence du mode d'interception sur cette variation de θ , ce qui suggère que la théorie pourrait être appliquée aux stratégies d'interception visuelles, mais aussi manuelles. Finalement, le nombre de participants avait une influence sur cette variation uniquement lorsque l'interception était réalisée avec les mains. Ceci peut être expliqué par le fait que la décision d'interception n'est pas uniquement basée sur une division géométrique de l'espace, mais repose aussi sur l'interaction entre les partenaires [Benerink2016]. En effet, la vitesse de balle étant constante et la trajectoire rectiligne, la balle n'influence pas la variation de θ au cours du temps, à l'inverse du mouvement du partenaire, qui lui, fluctue. Ainsi, dans une situation où un individu seul réalise l'interception d'une trajectoire de balle constante et rectiligne, il n'y a pas de raison que son mouvement soit perturbé au cours du temps. A l'inverse, lorsqu'un partenaire réel est présent, son mouvement durant l'essai est influencé par les mouvements du partenaire, et mène à une stratégie de poursuite moins viable et moins constante. Un point important à soulever est que cette observation n'était pas faite lors de l'interception avec la tête, c'est-à-dire que la variation de θ était similaire dans les conditions HeA et HeC. Encore une fois, la contrainte temporelle pourrait être à l'origine de ceci : comme les participants devaient réagir rapidement, il est possible qu'ils aient pris moins d'information sur le partenaire et son mouvement durant un essai en HeC, et dès lors, ont moins bien coordonné leurs mouvements l'un avec l'autre. De plus, dans la condition HeC, la tête jouait un double rôle : prélever l'information disponible dans la situation (sur la balle et le partenaire), et intercepter la balle. Ainsi, l'interception était probablement plus difficile à réa-

liser avec la tête, également pour cette raison. Ce résultat pourrait alors être relié à l'observation précédemment faite que la plupart des essais arrivant dans la zone d'incertitude n'étaient pas interceptés dans la condition HeC. En effet, sous de fortes contraintes temporelles, les participants ont pu faire le choix de se focaliser moins sur l'information venant du partenaire et de son mouvement, et plus sur leur propre déplacement dans la scène, tout en réduisant/limitant leurs actions dans le centre de la zone d'interception, afin d'éviter les risques de collisions avec le partenaire.

5.5 Limites et perspectives

Malgré ses méthodes novatrices dans le champ de la RV et de la coopération lors d'une interception collective de balle, cette approche a des limites. Premièrement, les questionnaires que nous avons utilisé sont subjectifs, et donc les résultats qu'ils présentent peut avoir été influencés par le jugement personnel des participants. En particulier, beaucoup de participants n'étaient pas très familiers des technologies de RV, et leur enthousiasme durant l'expérience a pu influencer leurs réponses. Cependant, nous avons utilisés ces questionnaires dans le but premier d'évaluer si oui ou non l'environnement virtuel et la tâche ont offert une expérience immersive, réaliste et intéressante, et les hauts scores de réponses sur l'échelle de Likert semblent indiquer que ce fut effectivement le cas. Deuxièmement, nous avons choisi d'utiliser uniquement 5 points de départ et 5 points d'arrivée, afin de baser notre protocole sur le setup utilisé dans d'autres études et ainsi pouvoir comparer plus facilement les résultats. Bien qu'une distance aléatoire ait été ajoutée au point de départ et au point d'arrivée (afin que la balle puisse démarrer et arriver n'importe où), il pourrait être intéressant d'explorer l'influence de différents nombres de points de départ et d'arrivée. Ensuite, nous avons essayé de construire une situation immersive et réaliste, et d'aucun pourrait mettre en avant le fait que notre situation n'est pas une situation réelle. Ceci est vrai, mais, comme dans toute cette thèse, nous avons tenté de préserver le cycle perception-action [Craig2013] afin de proposer un engagement total des participants et une interaction complète avec l'environnement et le partenaire, et donc, nous pensons que notre setup a tout de même proposé une bonne validité écologique tout en offrant un cadre rigoureux et reproductible d'analyse.

Nous avons vu que *l'overlap* était influencé par des éléments comme la complexité de la tâche ou encore le mode d'interception. Ceci est un point important qui pourrait être intéressant dans de nombreuses situations, par exemple en sports collectifs où nous rencontrons souvent ces différentes conditions : la distance entre deux défenseurs varie en football, la complexité de la tâche n'est pas la même entre contre-attaques en handball, et l'interception est réalisée avec les mains en volley-ball

et avec les pieds ou la tête en football, etc. Pour cette raison, nous pensons que le concept *d'overlap* semble intéressant pour étudier de nombreuses situations sportives où l'interaction entre les partenaires est primordiale, et les futures études pourront étudier la collaboration et l'interférence entre les participants dans différentes activités, avec d'autres nombres et niveaux de participants, ou bien des contraintes temporelles différentes.

5.6 Conclusion

Dans cette étude, nous avons étudié la façon dont deux personnes coopèrent, et comment l'interférence entre eux peut survenir dans une tâche coopérative de réception de service en volley-ball. Nous avons basé notre étude sur un système de réalité virtuelle où les participants devaient intercepter des balles avec la tête ou les mains, sans communication verbale. Nos résultats suggèrent en premier lieu que l'interception était plus efficace lorsque réalisée avec les mains, ce qui n'est pas en accord avec les observations faites par [Zaal2003]. Cependant, les systèmes de RV et le setup n'étaient pas exactement les mêmes dans notre étude, et nous pensons aussi que, en leur donnant des feedbacks après chaque essai (comme suggéré par [Zaal2003]), nous avons permis aux participants de rapidement adapter leur mouvement et devenir plus efficace dans la perception et l'interception des trajectoires de balle. Nous avons également trouvé que, lorsqu'ils réalisaient l'interception par équipes de deux, les participants étaient capables de réaliser efficacement la tâche (hauts scores d'interception), mais aussi que de l'interférence apparaissait, rendant la frontière entre les deux espaces d'interception difficile à établir précisément. Dans notre étude, nous avons trouvé que cette interférence dépendait du mode d'interception (c'est-à-dire mains ou tête), mais aussi que le mouvement d'interception était initié plus tard lorsque deux participants étaient présents. Ceci est en accord avec les observations déjà faites (voir par exemple [Richardson2015] et la partie 4 de cette thèse), et soulève un point important pour les applications pratiques, comme dans les sports collectifs où les contraintes temporelles sont souvent élevées. Finalement, nous avons trouvé que l'étude de la variation du *bearing angle* était un outil intéressant pour analyser et expliquer l'issue de la situation (c'est-à-dire essai intercepté ou essai manqué), lorsque l'interception était réalisée avec les mains ou avec la tête. Comme les interceptions dans les sports collectifs peuvent être réalisées avec la tête ou la main (ou même d'autres parties du corps), ces résultats semblent prometteurs pour nous.

6 Discussion générale et Perspectives

Ce travail de thèse s'intéresse à la façon dont deux individus s'organisent pour réaliser collectivement une interception de balle, dans un environnement virtuel. Plus précisément, si la question de la division tacite de l'espace d'interception est au cœur de nos réflexions, nous avons également cherché à comprendre comment une interférence pouvait apparaître entre eux. Cette situation d'interférence, en effet, est fréquemment rencontrée dans la vie quotidienne (*e.g.* collision avec un passant dans la rue), ou dans des situations plus spécifiques comme dans les sports collectifs (*e.g.* gêne entre deux coéquipiers prenant un rebond au basket-ball). Compte tenu des méconnaissances de la littérature à son sujet, ses origines ou encore les facteurs qui l'influencent, la question de cette interférence nous apparaît alors importante. Nous avons donc cherché dans un premier temps à identifier dans la littérature la pertinence de la réalité virtuelle comme outil d'analyse, puis nous avons construit les outils collaboratifs (pour HMD et CAVE) qui nous ont permis d'offrir des situations d'interactions multiples dans un contexte standardisé, reproductible et écologique. Par la suite, ces outils ont été appliqués et utilisés pour étudier la façon dont deux individus organisent tacitement leurs actions pour atteindre un but commun (ici, l'interception d'une balle), selon différents critères spatiaux (positionnement des participants), niveaux de complexité de la tâche (*i.e.* informations disponibles, incertitude sur les mouvements des coéquipiers), ou encore modes d'interception (*i.e.* tête ou mains). L'apparition et l'évolution de l'interférence sont alors au cœur de notre analyse, afin d'en identifier les éléments essentiels, et les discuter au regard de tâches d'interception collective de balles, comme rencontré dans de nombreux sports collectifs.

En nous inspirant de la littérature, et notamment des études menées par Niek H. Benerink durant son travail de thèse, nous avons cherché à améliorer les approches utilisées en proposant des tâches réalisées en environnement virtuel tridimensionnel, via les outils de réalité virtuelle. Nous avons ainsi souhaité donner l'accent à l'aspect écologique de la situation et à l'implication physique des participants dans la tâche, afin de nous affranchir des problèmes parfois observés lors de tâches simples ou fermées, décontextualisés, et/ou mettant en jeu une prise de décision limitée. Ainsi, à notre connaissance, le travail réalisé dans cette thèse est le premier à avoir investigué la coopération et l'interférence entre deux participants en réalité virtuelle lors d'une

tâche coopérative d'interception de balles.

6.1 Perception-action

Tout d'abord, l'analyse de la littérature nous a mené à la question de l'importance du couplage perception-action dans la réalisation d'une tâche. Nous avons identifié la nécessité de maintenir et respecter ce couplage, dans l'approche écologique, pour appréhender pleinement les relations entre individu et environnement et/ou entre individus, et explorer nos situations dans un cadre d'étude proche d'un cadre réel. Comme précédemment évoqué, les outils de réalité virtuelle utilisés ici nous ont permis de proposer aux participants un affichage stéréoscopique, un engagement physique dans la tâche, et une interaction avec le partenaire et l'environnement. Dans une situation où la relation entre la perception et le mouvement améliore la perception efficace des informations pertinentes de la scène [Cornus1999], s'approcher au plus près de conditions réelles semble alors primordial.

Dans le cadre des stratégies prospectives, l'idée de contrôle et de régulation continu du mouvement permet d'aborder efficacement la complexité d'une situation comme celle à laquelle nous nous intéressons. Elle suggère que l'individu, au cours de la tâche, est capable de percevoir et utiliser les indices disponibles (sur la tâche, le partenaire, l'environnement, etc.) pour adapter son mouvement aux besoins à court et moyen termes, afin d'atteindre le but fixé. Dans cette thèse, nous sommes partis du postulat d'une relation forte et réciproque entre perception et action, et les approches méthodologiques exploitées ont permis d'identifier un poids important des variables prospectives dans le comportement des individus. Par exemple, dans le chapitre 4, nous avons pu observer de nombreux abandons de mouvement des participants, issus d'une régulation *online* du comportement moteur. En effet, les participants interprétaient souvent une balle démarrant proche d'eux comme une balle qu'ils devaient intercepter, mais l'évolution de sa trajectoire au cours du temps, de même que l'engagement physique du partenaire, menait à l'abandon de l'interception : la prise d'information continue a permis aux individus d'adapter leur mouvement, pour servir l'objectif commun au mieux (ici, ne pas gêner le partenaire réalisant l'interception). De même, dans le chapitre 5, nous avons trouvé un poids important de la théorie du *constant bearing angle* dans l'analyse du mouvement d'interception, pour les essais réussis comparés aux essais manqués. Dès lors, les participants n'ont pas su, lors des essais manqués, percevoir et/ou exploiter les informations pertinentes de la situation, pour adopter une stratégie d'interception collective efficace.

Au regard de ces éléments, une innovation de notre approche réside dans le lien

permis entre perception et action, au cours de nos études. Par le maintien de cette interrelation, elle fournit aux individus des éléments probants sur la situation et son évolution. Dans ce cadre dynamique d'interception, la perception est directe et guide l'action au travers des affordances, tout en respectant le souhait de Gibson (1979) selon lequel *we must perceive in order to move, but we also move in order to perceive* ([Gibson1979], p. 223).

6.2 Analyse et modélisation des coordinations interpersonnelles et interférences

En ce sens, l'utilisation de la réalité virtuelle a de nombreux avantages, par exemple pour l'analyse de situations sportives [Bideau2010]. Manipuler, standardiser, adapter la situation et les contraintes spatio-temporelles qu'elle implique sont autant d'avantages essentiels lorsque l'on s'intéresse à des situations complexes, comme l'interaction et la coopération lors d'une tâche d'interception de balle. De plus, elle permet au participant d'adapter son point de vue, dynamiquement et à tout instant, et d'exploiter des informations stéréoscopiques, afin de s'approcher au plus près de conditions réelles de pratique et permettre une interprétation optimale de la performance observée. Nous pensons que ce point de vue adaptatif et cet affichage stéréoscopique sont des éléments pertinents à prendre en compte lors d'analyse de situations collaboratives, car ils apportent à l'individu et à sa perception (et *de facto* son action) des horizons supplémentaires, en comparaison d'autres études menées sur des écrans vidéo (voir par exemple [Richardson2015, Benerink2016, Benerink2018, van Opstal2018]). En ce sens, nous avons permis dans cette thèse la mise en place d'un système réunissant ces différentes propriétés, permettant aux participants d'avoir des comportements les plus "naturels" possibles.

De manière générale, nos résultats montrent que dans ces conditions, les individus ont auto-organisé leurs actions et interagi efficacement, pour décider lequel des deux devait intercepter la balle. En effet, dans les études relatives à cette thèse, nous avons trouvé une division tacite de l'espace, chaque participant couvrant environ 50% de l'espace d'interception. De plus, dans une situation aux fortes contraintes temporelles, l'interception était plus efficace lorsque deux individus étaient présents comparé à un participant seul. En revanche, dans l'ensemble de nos situations, l'interaction entre les participants a mené à l'apparition d'une zone d'incertitude, c'est-à-dire une zone où il était pour eux difficile de déterminer qui devait intercepter la balle, et qui ne devait pas. Pour traduire et analyser objectivement l'évolution de cette zone, nous avons alors utilisé le concept de *l'overlap*. Dans notre

première étude (Chapitre 4), nous avons étudié l'influence de différents niveaux de complexité de la tâche (c'est-à-dire différentes conditions d'incertitude sur l'action du partenaire, et d'informations visuelles disponibles) sur la zone d'incertitude, et nous avons trouvé des valeurs *d'overlap* d'environ 40 à 60 centimètres. Ces valeurs sont du même ordre que celles trouvées dans notre seconde étude (Chapitre 5), où nous avons également cherché à étudier l'influence du mode d'interception (tête *vs.* main) sur la zone d'incertitude. Ainsi, malgré des axes d'interception différents, nous avons trouvé des valeurs similaires dans nos deux études. D'autres auteurs, cependant, ont trouvé des valeurs *d'overlap* plus faibles dans une tâche d'interception de balle [Benerink2016, Benerink2018, van Opstal2018], avec des valeurs inférieures à 25 centimètres. Ces études, en revanche, ont été réalisées sur un écran d'ordinateur partagé, et la largeur de l'espace d'interception était d'environ 1 m (contre 4 m dans notre première étude, voir chapitre 4 ; et 5 m dans notre deuxième étude, voir chapitre 5). Pris ensemble, ces éléments offrent des observations intéressantes : dans une tâche coopérative d'interception de balle, la division de la tâche semble plutôt bien définie, mais la frontière entre les espaces d'interception reste relativement variable, et l'interférence entre les partenaires semble être influencée par le setup utilisé, par la complexité de la tâche, par la taille totale de l'espace d'interception, ou encore par le mode d'interception utilisé.

De plus, un autre élément probant ressort de ces travaux : lorsque deux individus sont présents, le temps d'initiation de mouvement est plus important. Ceci est en accord avec la littérature, et a notamment été soulevé par Darbutas et al. (2013) qui ont expliqué que le temps de réaction était lié à la complexité de la tâche [Darbutas2013]. Or, lors d'une situation où l'interception est réalisée conjointement, chaque participant doit gérer les informations venant non seulement de la balle, mais aussi du partenaire, et *de facto*, la complexité de la situation augmente. Dès lors, il semble que le simple fait de devoir interagir, et avec cela, de faire face à une situation plus complexe, puisse influencer l'initiation de mouvement, et donc la zone d'incertitude. En effet, le temps (restant) disponible pour intercepter la balle étant plus faible lors d'une interaction entre plusieurs participants, la décision est d'autant plus contrainte et peut mener à d'importantes interférences.

Une différence notable avec les résultats issus de la littérature a été trouvée. Zaal et Michaels (2003), dans une étude sur l'interception de balle en RV, avaient observé de meilleurs résultats lors d'une interception avec la tête comparée aux mains [Zaal2003]. Si nos résultats ne semblent pas aller dans ce sens (cf. chapitre 5, interception systématiquement meilleure avec les mains qu'avec la tête), il semble que l'élément principal permettant de l'expliquer ait été apporté par Zaal et Michaels

eux-mêmes : la présence d'un feedback, en environnement virtuel, est important afin de permettre aux participants de comprendre l'issue de leur action, et de l'adapter. Or, dans cette thèse, nous avons fourni aux participants des feedbacks après chaque essai (ce qui, dans l'étude de Zaal et Michaels, n'était le cas que pour les interceptions avec la tête), et il semblerait alors que ceci ait eu un effet important sur la performance des sujets. De plus, la forte contrainte temporelle de notre situation sous-entend une nécessité d'agir rapidement, et les mains sont majoritairement utilisées pour des actions d'interception rapide [Benerink2015] (grâce notamment à une masse faible, et une importante liberté de mouvements des membres supérieurs).

Ainsi, ces éléments reportent les plus importantes observations que nous avons faites sur la division de l'espace d'interception et l'apparition/évolution de l'interférence entre deux participants, lors d'une tâche collective d'interception de balle. En particulier, ces éléments et résultats nous semblent pertinents pour le cadre plus large des sports collectifs, qui mettent continuellement en jeu des interactions entre les différents acteurs, et où la bonne coopération entre partenaires est souvent déterminante dans la performance globale de l'équipe.

6.3 Coopération en sport et perspectives dans le domaine de l'entraînement sportif

Avant tout, nos résultats globaux suggèrent que la coordination d'équipe émerge de l'interaction entre les participants, et l'interférence qui apparaît entre eux dépend de la complexité de la tâche (incertitude sur l'action du partenaire, information visuelle disponible, mode d'interception). Dans une approche dynamique de la coordination d'équipe, inspirée des concepts de psychologie écologique [Gibson1979, Cooke2013], l'efficacité de l'équipe réside en partie dans la capacité des participants à interagir et autoréguler leurs actions en temps réel, en fonction du flux d'informations qui arrive de l'environnement, de la tâche et du partenaire, c'est-à-dire, en fonction des affordances partagées [Silva2013]. L'interaction dans une équipe peut dès lors être manipulée afin d'augmenter son efficacité [Gorman2014]. Pour apporter un exemple issu du domaine sportif, les joueurs de volley-ball réalisent souvent pour s'entraîner un grand nombre de réceptions de services, et mettent en place des stratégies d'équipe afin de limiter l'interférence, et avec elle, des réceptions potentiellement inefficaces. Cependant, dans des situations aux fortes contraintes temporelles, la capacité à percevoir et extraire l'information disponible et utile est essentielle, afin de mieux organiser sa propre action en fonction de la situation et son évolution. Au regard de cet aspect, la coordination d'équipe ne peut pas être réduite à une simple

somme des capacités de ses individus [DeChurch2010], et les interactions au niveau de l'équipe sont aussi essentielles. C'est dans cet optique qu'il nous est apparu important de nous intéresser à la façon dont l'organisation collective se met en place, lors d'interactions entre les différents partenaires.

En particulier, nous avons identifié la notion d'*overlap* comme particulièrement intéressante pour quantifier mathématiquement l'interférence et son évolution au regard des conditions de la situation. Il semble en effet que lors d'une interception à deux, l'*overlap* permette de visualiser efficacement la façon dont est répartie la tâche (*i.e.* de définir globalement les domaines respectifs d'interception des participants). Il permet également d'identifier la zone d'incertitude, dans laquelle les individus ont plus de difficultés à identifier lequel doit intercepter la balle, et lequel doit s'effacer pour laisser agir le partenaire. Ce point est particulièrement intéressant dans un contexte de sport d'équipe, car ces situations d'interférence y sont fréquemment rencontrées, et bien souvent délétères. Ainsi, de façon plus élargie, nous pensons que l'*overlap* est un élément intéressant à prendre en compte pour analyser les interférences existant entre au moins deux individus, dans toute tâche collaborative d'interception de mobile. L'objectif étant d'atteindre une division parfaite de l'espace d'interception, la minimisation de cet *overlap* pourrait être un objectif d'entraînement d'équipe, voire un critère d'évaluation de performance entre deux (ou plus) partenaires : en nous basant sur l'exemple de la réception de service en volley-ball, l'efficacité de l'interception de deux participants se traduirait, entre autres choses, par une bonne division de l'espace, et donc, un *overlap* faible. Un entraîneur pourrait alors faire le choix de se baser également sur ce critère lors de la composition de son équipe. En ce sens, nous pensons que l'*overlap* peut être un outil d'analyse pertinent à la fois dans un objectif de recherche, mais pourrait également être utilisé de manière plus directe, concrète, par les différents acteurs du monde sportif.

Ensuite, la littérature avait déjà identifié l'évolution du *bearing angle* comme une stratégie prospective d'un individu lors d'une tâche d'interception latérale de balle (voir par exemple [Chardenon2002, Chardenon2004, Chardenon2005, Fajen2007]). Nous avons trouvé dans cette thèse que cette observation était toujours valable lorsque plusieurs participants coopéraient pour intercepter la balle, mais également qu'elle était pertinente pour une interception réalisée avec la tête, ou avec la main. C'est un résultat intéressant au regard de l'analyse de situations sportives, qui mettent en jeu non seulement des interactions entre participants, mais aussi des interceptions de balles avec différentes parties du corps (tête, mains, pieds, etc.). En ce sens, nous pensons que l'étude de l'évolution de $d\theta/dt$ pourrait être exploitée dans l'analyse de l'interception de balle à plus grande échelle que dans le présent tra-

vail de thèse, pour un panel large de situations d'interactions rencontrées en sports collectifs, mais également dans la vie quotidienne.

Enfin, Stone et al. (2018) ont souligné que l'utilisation de systèmes de RV dans l'apprentissage pourrait fournir aux athlètes des conditions et situations spécifiques à leur pratique, tout en englobant les aspects de cognition, perception et action [Stone2018]. S'appuyant sur un cadre écologique dynamique, elle pourrait donner vie à la création d'environnements virtuels qui permettent de spécifier l'entraînement, en focalisant l'attention des participants sur des points spécifiques parmi un large champ d'affordances et de possibilités [Davids2017]. Les auteurs prennent alors l'exemple de jeunes footballeurs, pour lesquels un système de RV pourrait : 1) enrichir la performance de l'athlète en individualisant les programmes d'entraînement, en parallèle des pratiques physiques en groupe (*i.e.* avec les autres joueurs), 2) réduire le temps d'atteinte d'un état optimal de forme et de performance lors d'un retour de blessure, et 3) favoriser l'engagement (*i.e.* motivation, investissement) des joueurs sur de longues périodes de pratique. Il est important de souligner que l'objectif de la RV n'est bien entendu pas de remplacer le rôle des professionnels du monde du sport, comme les entraîneurs, mais bien d'offrir des supports différents d'entraînement, afin d'enrichir l'apprentissage des athlètes [Stone2018], sans se substituer aux méthodes plus traditionnelles. De plus, nous pensons que les outils collaboratifs de RV développés dans cette thèse apportent des avantages potentiels supplémentaires pour les acteurs du monde du sport : la possibilité de se confronter, en temps réel, à d'autres individus dans l'environnement virtuel. Dès lors, cette possibilité d'interactions élargit le champ des situations et apprentissages possibles, en offrant aux joueurs (voire aux entraîneurs, et autres professionnels) des situations plus proches de situations réellement rencontrées, tout en profitant du contrôle de l'environnement, et de la standardisation des situations. Ainsi, au-delà de la tâche collaborative d'interception de balle étudiée ici, nous pensons que le champ des possibles est large pour l'entraînement sportif, et espérons que les résultats observés offriront un point de départ pour l'étude de nombreuses autres situations sportives interactives, et mettant en jeu plusieurs individus en temps réel.

En conclusion, ce travail de thèse a donc permis de répondre à plusieurs points. Nous avons pu en effet mettre en avant la façon dont la réalité virtuelle a été exploitée pour s'intéresser aux situations sportives et dynamiques. La construction d'outils collaboratifs en RV (HMD et CAVE) nous a ensuite permis d'avoir à dis-

position des systèmes d'analyse en temps réel de situations d'interactions multiples, dans un contexte standardisé et écologique. Nous avons pu, dès lors, explorer la façon dont deux individus coordonnent leurs actions pour décider tacitement qui doit et qui ne doit pas intercepter la balle. De plus, nous avons exploré l'apparition d'une interférence entre eux, et étudié son évolution en fonction des conditions de réalisation de la tâche. Ce travail, cependant, comporte plusieurs limites qu'il nous apparaît important de soulever. En premier lieu, nous avons souhaité nous approcher au plus près de conditions réelles de pratiques, mais nos situations restent malgré tout différentes de situations réelles. En particulier, il est possible que les indices visuels disponibles dans l'environnement, de même que l'absence d'informations auditives, aient influencé les conditions de pratique. Or, les informations contextuelles ou situationnelles peuvent parfois modifier la prise de décision ou l'action des individus [Williams2002, Crognier2007, Stinson2014]. Si ces choix ont été faits pour des raisons méthodologiques déjà évoquées, il est toutefois possible et intéressant de les discuter, et les travaux futurs pourront s'intéresser à leur poids dans la situation, son issue, et l'expérience immersive des participants. De plus, nous avons utilisé *l'overlap* comme élément de quantification de l'interférence. S'il permet d'identifier la façon dont les individus interpénètrent leurs espaces d'interception, la performance globale est en revanche restée bonne, et peu de collisions ont été observées, comme souligné également par [Benerink2017]. Cependant, une différence majeure entre les travaux de Niek H. Benerink et les nôtres est à soulever : dans notre approche, les participants ont engagé des mouvements dynamiques totaux, mettant en jeu leur corps complet, ce qui n'était pas le cas dans les travaux de Niek H. Benerink. En ce sens, nous pensons que, si *l'overlap* n'est pas suffisant pour comprendre totalement l'interaction et l'interférence entre deux individus lors d'une tâche d'interception de balle (car ne reflète pas la totalité des composantes mises en jeu dans la performance), il reste cependant intéressant au regard de situations réelles de collaborations. Il permet notamment d'identifier et quantifier la zone d'interférence, la plupart des essais manqués étant situés dans cette zone. De plus, les valeurs similaires *d'overlap* trouvée dans nos deux études laissent penser que, malgré des configurations différentes (tâches différentes, axes d'interception différents, etc.), des résultats semblables peuvent être observés. Dès lors, il pourrait être pertinent et complémentaire de s'intéresser à l'étude de l'interaction et l'interférence selon d'autres axes d'interception, voire dans des plans d'interception ou même à une organisation des individus dans l'espace total. Cette interférence pourrait également être influencée par des éléments importants comme la position de départ, l'orientation des participants (par rapport à la balle, l'un par rapport à l'autre, etc.), mais

aussi le niveau d'expertise des participants (équipes débutantes, équipes expertes, équipes mixtes, etc.). Enfin, nous nous sommes ici centrés sur l'aspect comportemental de l'interaction et la coopération, mais il semblerait pertinent de s'intéresser également à d'autres approches, par exemple neurophysiologique. Les centres décisionnels étant complexes, et les mécanismes mis en jeu divers et interdépendants, nous pensons par exemple que l'analyse d'une situation et la prise de décision d'un ou plusieurs individus pourraient être abordées de manière intéressante via des outils comme l'électroencéphalogramme (EEG) (voir par exemple la récente étude de [Fadde2019]) ou l'eye-tracking (comme par exemple utilisé par [Porras-Garcia2019]), afin d'accéder à des informations supplémentaires comme les stratégies visuelles ou l'activité cérébrale des individus. En ce sens, nous pensons qu'un couplage de ces outils avec une situation de réalité virtuelle constitue un avenir intéressant et prometteur dans la compréhension des interactions, des décisions, et avec elles, des interférences entre plusieurs participants.

7 Contributions scientifiques

Publications liées à la thèse

Articles internationaux dans revues indexées

- Faure, C., Limballe, A., Bideau, B. and Kulpa, R. Virtual reality to assess and train team ball sports performance : A scoping review. *Journal of Sports Sciences*, In Press, 2019.
- Faure, C., Limballe, A., Bideau, B., Sorel, A., Perrin, T. and Kulpa, R. Dyadic interference leads to area of uncertainty during face-to-face cooperative interception task. *Frontiers in ICT*, Frontiers, Accepted.
- Faure, C., Bideau, B., Limballe, A. and Kulpa, R. Exploring team cooperation and interference in virtual reality : application to a task of volleyball serve reception. *Journal of Sports Sciences*, Submitted.

Congrès internationaux

- Faure, C., Limballe, A., Bideau, B., Sorel, A., Perrin, T. and Kulpa, R. Analysis of interference between players during face-to-face interception task. European College of Sport Science, Prague, Czech Republic, 3-6th July, 2019.
- Faure, C., Limballe, A., Bideau, B., Sorel, A., Perrin, T. and Kulpa, R. Acting Together, Acting Stronger? Interference between participants during face-to-face cooperative interception task. IEEE Virtual Reality, Osaka, Japan, 23-27th March, 2019.

Congrès nationaux

- Faure, C., Kulpa, R., Limballe, A., Bideau, B. Étude de la cinétique de déplacement lors d'une tâche d'interception en environnement virtuel immersif. Association Française de Réalité Virtuelle, Augmentée, Mixte et d'Interaction 3D (AFRV), Rennes, France, 11-13 October 2017.

Autres publications

Articles internationaux dans revues indexées

- Faure, C., Limballe, A. and Kerhervé, H.A. Fooling the Brain, Fooling the Pain : The Role of Mirror Therapy and Modern Uses in Virtual Reality. *Frontiers for Young Minds*, Frontiers, 2019.
- Byrne, C, Faure, C., Keene, D.J. and Lamb, S.E. Ageing, muscle power and physical function : a systematic review and implications for pragmatic training interventions. *Sports Medicine*, 2016.
- Perrin, T., Faure, C. Nay, K., Cattozzo, G., Sorel, A., Kulpa, R. and Kerhervé, H.A. Virtual reality gaming elevates heart rate but not energy expenditure compared to conventional exercise. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. In review.

Congrès internationaux

- Perrin, T., Kerhervé, H.A., Faure, C., Bideau, B. and Kulpa, R. Enactive approach to assess perceived speed error during walking and running in virtual reality. *IEEE Virtual Reality*, Osaka, Japan, 23-27th March, 2019.
- Perrin, T., Kerhervé, H.A., Faure, C., Cattozzo, G., Bideau, B. and Kulpa, R. Evaluation of perceived speed error during walking and running in a virtual environment. *European College of Sport Science*, Dublin, Ireland, 4-7th July, 2018.
- Perrin, T., Faure, C., Nay, K., Cattozzo, G., Sorel, A., Kerhervé, H.A., Bideau, B. and Kulpa, R. Physiological load during an active virtual reality game. *European College of Sport Science*, Dublin, Ireland, 4-7th July, 2018.
- Faure, C., Kulpa, R., Le Targat, K., Revel, C., Sorel, A. and Bideau, B. Training of visuospatial attention of professional soccer goalkeepers with multiple-object tracking. *World Conference on Science and Soccer*, Rennes, France, 31st May - 2nd June 2017.
- Limballe, A., Faure, C., Desfontaine, P., Bideau, B. and Kulpa, R. How gender affects kinematics of dribbling in soccer. *World Conference on Science and Soccer*, Rennes, France, 31st May - 2nd June 2017.

Bibliographie

- [Abernethy1990a] Abernethy, B. *Anticipation in squash : Differences in advance cue utilization between expert and novice players*. Journal of sports sciences, vol. 8, n° 1, pages 17–34, 1990.
- [Abernethy1990b] Abernethy, B. *Expertise, visual search, and information pick-up in squash*. Perception, vol. 19, n° 1, pages 63–77, 1990.
- [Abernethy1993a] Abernethy, B. *Searching for the minimal essential information for skilled perception and action*. Psychological research, vol. 55, n° 2, pages 131–138, 1993.
- [Abernethy1993b] Abernethy, B., Thomas, K. T. and Thomas, J. T. *Strategies for improving understanding of motor expertise [or mistakes we have made and things we have learned !!]*. In Advances in psychology, volume 102, pages 317–356. Elsevier, 1993.
- [Abernethy2008] Abernethy, B. and Mann, D. *Dual pathways or dueling pathways for visual anticipation ? A response to van der Kamp, Rivas, van Doorn & Savelsbergh (2007)*. International Journal of Sport Psychology, vol. 39, n° 2, pages 136–141, 2008.
- [Agelonidis2004] Agelonidis, Y. *The jump serve in volleyball : From oblivion to dominance*. Journal of Human Movement Studies, vol. 47, n° 3, pages 205–214, 2004.
- [Albert1984] Albert, A. and Anderson, J. A. *On the existence of maximum likelihood estimates in logistic regression models*. Biometrika, vol. 71, n° 1, pages 1–10, 1984.
- [Andersen2001] Andersen, G. J. and Kim, R. D. *Perceptual information and attentional constraints in visual search of collision events*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 27, n° 5, page 1039, 2001.
- [Araújo2004] Araújo, D., Davids, K., Bennett, S. J., Button, C. and Chapman, G. *Emergence of sport skills under constraints*. Skill

- acquisition in sport : Research, theory and practice, page 409, 2004.
- [Araujo2006] Araujo, D., Davids, K. and Hristovski, R. *The ecological dynamics of decision making in sport*. Psychology of sport and exercise, vol. 7, n° 6, pages 653–676, 2006.
- [Araújo2016] Araújo, D. and Davids, K. *Team synergies in sport : theory and measures*. Frontiers in psychology, vol. 7, page 1449, 2016.
- [Araújo2019] Araújo, D., Hristovski, R., Seifert, L., Carvalho, J. and Davids, K. *Ecological cognition : expert decision-making behaviour in sport*. International Review of Sport and Exercise Psychology, vol. 12, n° 1, pages 1–25, 2019.
- [Arnaldi2018] Arnaldi, B., Guitton, P. and Moreau, G. *Virtual reality and augmented reality : Myths and realities*. John Wiley & Sons, 2018.
- [Barfield1993] Barfield, W. and Weghorst, S. *The sense of presence within virtual environments : A conceptual framework*. Advances in Factors Ergonomics, vol. 19, pages 699–699, 1993.
- [Barfield1995] Barfield, W., Zeltzer, D., Sheridan, T. and Slater, M. *Presence and performance within virtual environments*. Virtual environments and advanced interface design, pages 473–513, 1995.
- [Barrett2004] Barrett, J. *Side effects of virtual environments : A review of the literature*. Rapport technique, Defence Science and Technology Organisation, Canberra, Australia, 2004.
- [Bastin2006] Bastin, J., Craig, C. and Montagne, G. *Prospective strategies underlie the control of interceptive actions*. Human movement science, vol. 25, pages 718–732, Décembre 2006.
- [Bastin2010] Bastin, J., Fajen, B. R. and Montagne, G. *Controlling speed and direction during interception : an affordance-based approach*. Experimental brain research, vol. 201, n° 4, pages 763–780, 2010.
- [Benerink2015] Benerink, N., Bootsma, R. and Zaal, F. *Different temporal bases for body and arm movements in volleyball serve reception*. Scandinavian journal of medicine & science in sports, vol. 25, n° 5, pages 603–609, 2015.

- [Benerink2016] Benerink, N. H., Zaal, F. T., Casanova, R., Bonnardel, N. and Bootsma, R. J. *Playing 'pong' together : Emergent coordination in a doubles interception task*. *Frontiers in psychology*, vol. 7, 2016.
- [Benerink2017] Benerink, N. *Playing pong together : a new experimental paradigm to study social coordination in a doubles interception task*. Thèse, Aix-Marseille Université, 2017. Thèse de doctorat dirigée par Bootsma, Reinoud JanBonnardel, Nathalie et Zaal, Frank Sciences du Mouvement Humain Aix-Marseille 2017.
- [Benerink2018] Benerink, N. H., Zaal, F. T., Casanova, R., Bonnardel, N. and Bootsma, R. J. *Division of labor as an emergent phenomenon of social coordination : The example of playing doubles-pong*. *Human movement science*, vol. 57, pages 134–148, 2018.
- [Benford2001] Benford, S., Greenhalgh, C., Rodden, T. and Pycock, J. *Collaborative virtual environments*. *Communications of the ACM*, vol. 44, n° 7, pages 79–85, 2001.
- [Bernieri1988] Bernieri, F. J., Reznick, J. S. and Rosenthal, R. *Synchrony, pseudosynchrony, and dissynchrony : measuring the entrainment process in mother-infant interactions*. *Journal of personality and social psychology*, vol. 54, n° 2, page 243, 1988.
- [Bernieri1991] Bernieri, F. and Rosenthal, R. *Interpersonal coordination : behavior matching and interactional synchrony*. *Fundamentals of Nonverbal Behavior. Studies in Emotion and Social Interaction*, 01 1991.
- [Bernstein1967] Bernstein, N. *The coordination and regulation of movements*. Oxford : Pergamon Press, 1967.
- [Berthoz1997] Berthoz, A. *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, 1997.
- [Bewick2005] Bewick, V., Cheek, L. and Ball, J. *Statistics review 14 : Logistic regression*. *Critical care (London, England)*, vol. 9, pages 112–118, Février 2005.
- [Bideau2003] Bideau, B., Kulpa, R., Ménardais, S., Fradet, L., Multon, F., Delamarche, P. and Arnaldi, B. *Real handball goalkeeper vs. virtual handball thrower*. *Presence : teleoperators and virtual environments*, vol. 12, n° 4, pages 411–421, 2003.

- [Bideau2004] Bideau, B., Multon, F., Kulpa, R., Fradet, L., Arnaldi, B. and Delamarche, P. *Using virtual reality to analyze links between handball thrower kinematics and goalkeeper's reactions*. Neuroscience letters, vol. 372, n° 1, pages 119–122, 2004.
- [Bideau2010] Bideau, B., Kulpa, R., Vignais, N., Brault, S., Multon, F. and Craig, C. *Using virtual reality to analyze sports performance*. IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 30, n° 2, pages 14–21, 2010.
- [Blickensderfer2010] Blickensderfer, E. L., Reynolds, R., Salas, E. and Cannon-Bowers, J. A. *Shared expectations and implicit coordination in tennis doubles teams*. Journal of Applied Sport Psychology, vol. 22, n° 4, pages 486–499, 2010.
- [Bootsma1992] Bootsma, R. J. and Peper, C. L. E. *Predictive visual information sources for the regulation of action with special emphasis on catching and hitting*. In Advances in psychology, volume 85, pages 285–314. Elsevier, 1992.
- [Bootsma2003] Bootsma, R. J. and Craig, C. M. *Information used in detecting upcoming collision*. Perception, vol. 32, n° 5, pages 525–544, 2003.
- [Bootsma2016] Bootsma, R. J., Ledouit, S., Casanova, R. and Zaal, F. T. *Fractional-order information in the visual control of lateral locomotor interception*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 42, n° 4, page 517, 2016.
- [Bourbousson2010] Bourbousson, J., Sève, C. and McGarry, T. *Space-time coordination dynamics in basketball : Part 1. Intra-and inter-couplings among player dyads*. Journal of sports sciences, vol. 28, n° 3, pages 339–347, 2010.
- [Brault2009] Brault, S., Bideau, B., Kulpa, R. and Craig, C. *Detecting Deceptive Movement in 1 vs. 1 Based on Global Body Displacement of a Rugby Player*. International Journal of Virtual Reality, vol. 8, n° 4, 2009.
- [Brault2011] Brault, S. *La feinte de corps au rugby : déterminants biomécaniques, processus de détection et action de défense : pourquoi l'expert est-il meilleur ?* Thèse, Rennes 2, 2011.

- [Brault2012] Brault, S., Bideau, B., Kulpa, R. and Craig, C. M. *Detecting deception in movement : the case of the side-step in rugby*. PLoS One, vol. 7, n° 6, page e37494, 2012.
- [Bray2003] Bray, K. and Kerwin, D. *Modelling the flight of a soccer ball in a direct free kick*. Journal of sports sciences, vol. 21, n° 2, pages 75–85, 2003.
- [Brennan2008] Brennan, S. E., Chen, X., Dickinson, C. A., Neider, M. B. and Zelinsky, G. J. *Coordinating cognition : The costs and benefits of shared gaze during collaborative search*. Cognition, vol. 106, n° 3, pages 1465–1477, 2008.
- [Brennan2010] Brennan, S. E., Galati, A. and Kuhlen, A. K. *Chapter 8 - Two Minds, One Dialog : Coordinating Speaking and Understanding*. In Ross, B. H., Ed., *The Psychology of Learning and Motivation : Advances in Research and Theory*, volume 53 of *Psychology of Learning and Motivation*, pages 301 – 344. Academic Press, 2010.
- [Brooks1999] Brooks, F. P. *What’s real about virtual reality ?* IEEE Computer graphics and applications, vol. 19, n° 6, pages 16–27, 1999.
- [Cañal-Bruland2010] Cañal-Bruland, R., van der Kamp, J. and van Kesteren, J. *An examination of motor and perceptual contributions to the recognition of deception from others’ actions*. Human movement science, vol. 29, n° 1, pages 94–102, 2010.
- [Carello1989] Carello, C., Groszofsky, A., Reichel, F. D., Solomon, H. Y. and Turvey, M. T. *Visually Perceiving What is Reachable*. Ecological Psychology, vol. 1, pages 27–54, 1989.
- [Chardenon2002] Chardenon, A., Montagne, G., Buekers, M. and Laurent, M. *The visual control of ball interception during human locomotion*. Neuroscience letters, vol. 334, n° 1, pages 13–16, 2002.
- [Chardenon2004] Chardenon, A., Montagne, G., Laurent, M. and Bootsma, R. *The perceptual control of goal-directed locomotion : a common control architecture for interception and navigation ?* Experimental Brain Research, vol. 158, n° 1, pages 100–108, 2004.
- [Chardenon2005] Chardenon, A., Montagne, G., Laurent, M. and Bootsma, R. *A robust solution for dealing with environmental changes in*

- intercepting moving balls*. Journal of motor behavior, vol. 37, n° 1, pages 52–62, 2005.
- [Chemero2011] Chemero, A. Radical embodied cognitive science. MIT press, 2011.
- [Chen2015] Chen, W. *Collaboration in Multi-user Immersive Virtual Environment*. Thèse, Université Paris-Saclay, 2015.
- [Churchill1998] Churchill, E. F. and Snowdon, D. *Collaborative virtual environments : an introductory review of issues and systems*. Virtual Reality, vol. 3, n° 1, pages 3–15, 1998.
- [Cisek2007] Cisek, P. *Cortical mechanisms of action selection : the affordance competition hypothesis*. Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences, vol. 362, n° 1485, pages 1585–1599, 2007.
- [Clark1996] Clark, H. H. Using language. Cambridge university press, 1996.
- [Coey2011] Coey, C., Varlet, M., Schmidt, R. C. and Richardson, M. J. *Effects of movement stability and congruency on the emergence of spontaneous interpersonal coordination*. Experimental brain research, vol. 211, n° 3-4, pages 483–493, 2011.
- [Cooke2013] Cooke, N. J., Gorman, J. C., Myers, C. W. and Duran, J. L. *Interactive Team Cognition*. Cognitive Science, vol. 37, n° 2, pages 255–285, 2013.
- [Cornejo2017] Cornejo, C., Cuadros, Z., Morales, R. and Paredes, J. *Interpersonal coordination : methods, achievements, and challenges*. Frontiers in psychology, vol. 8, page 1685, 2017.
- [Cornus1999] Cornus, S., Montagne, G. and Laurent, M. *Perception of a stepping-across affordance*. Ecological Psychology, vol. 11, n° 4, pages 249–267, 1999.
- [Correia2011] Correia, V., Araujo, D., Craig, C. and Passos, P. *Prospective information for pass decisional behavior in rugby union*. Human Movement Science, vol. 30, n° 5, pages 984–997, 2011.
- [Correia2016] Correia, V., Passos, P., Araújo, D., Davids, K., Diniz, A. and Kelso, J. S. *Coupling tendencies during exploratory behaviours of competing players in rugby union dyads*. European Journal of Sport Science, vol. 16, n° 1, pages 11–19, 2016.

- [Covaci2015] Covaci, A., Olivier, A.-H. and Multon, F. *Visual perspective and feedback guidance for vr free-throw training*. IEEE computer graphics and applications, vol. 35, n° 5, pages 55–65, 2015.
- [Cox1989] Cox, D. and Snell, E. *The analysis of binary data*, volume 46. Chapman & Hall., second edition, 1989.
- [Craig2006] Craig, C. M., Berton, E., Rao, G., Fernandez, L. and Bootsma, R. J. *Judging where a ball will go : the case of curved free kicks in football*. Naturwissenschaften, vol. 93, n° 2, pages 97–101, 2006.
- [Craig2009] Craig, C. M., Goulon, C., Berton, E., Rao, G., Fernandez, L. and Bootsma, R. J. *Optic variables used to judge future ball arrival position in expert and novice soccer players*. Attention, Perception, & Psychophysics, vol. 71, n° 3, pages 515–522, 2009.
- [Craig2011] Craig, C. M., Bastin, J. and Montagne, G. *How information guides movement : Intercepting curved free kicks in soccer*. Human movement science, vol. 30, n° 5, pages 931–941, 2011.
- [Craig2013] Craig, C. *Understanding perception and action in sport : how can virtual reality technology help ?* Sports Technology, vol. 6, n° 4, pages 161–169, 2013.
- [Crognier2007] Crognier, L. and Fery, Y. *40 years of research on anticipation in tennis : A critical review*. Science et Motricité, vol. 62, page 9, 2007.
- [Cruz-Neira1992] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V. and Hart, J. C. *The CAVE : audio visual experience automatic virtual environment*. Communications of the ACM, vol. 35, n° 6, pages 64–73, 1992.
- [Cutting1997] Cutting, J. E. *How the eye measures reality and virtual reality*. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, vol. 29, n° 1, pages 27–36, Mar 1997.
- [Darbutas2013] Darbutas, T., Juodzbalien, V., Skurvydas, A. and Krisinas, A. *Dependence of reaction time and movement speed on task complexity and age*. Medicina (Kaunas, Lithuania), vol. 49, pages 18–22, 2013.

- [Davids2005] Davids, K., Araújo, D. and Shuttleworth, R. *Applications of dynamical systems theory to football*. Science and football V, vol. 537, page 550, 2005.
- [Davids2017] Davids, K., Güllich, A., Shuttleworth, R. and Araújo, D. *Understanding environmental and task constraints on talent development : Analysis of micro-structure of practice and macro-structure of development histories*. In Routledge handbook of talent identification and development in sport, pages 192–206. Routledge, 2017.
- [Davis2016] Davis, T. *The ties that bind : unintentional spontaneous synchrony in social interactions*. In P. Passos, K. D. and Chow, J. Y., Eds., Interpersonal coordination and performance in social systems, pages 53–64. Routledge, 2016.
- [DeChurch2010] DeChurch, L. and Mesmer-Magnus, J. *The Cognitive Underpinnings of Effective Teamwork : A Meta-Analysis*. Journal of Applied Psychology, vol. 95, n° 1, pages 32–53, 1 2010.
- [Demetre1992] Demetre, J. D., Lee, D. N., Pitcairn, T. K., Grieve, R., Thomson, J. A. and Ampofo-Boateng, K. *Errors in young children's decisions about traffic gaps : Experiments with roadside simulations*. British Journal of psychology, vol. 83, n° 2, pages 189–202, 1992.
- [Demos2012] Demos, A. P., Chaffin, R., Begosh, K. T., Daniels, J. R. and Marsh, K. L. *Rocking to the beat : Effects of music and partner's movements on spontaneous interpersonal coordination*. Journal of Experimental Psychology : General, vol. 141, n° 1, page 49, 2012.
- [Dessing2010] Dessing, J. C. and Craig, C. M. *Bending it like Beckham : how to visually fool the goalkeeper*. PLoS One, vol. 5, n° 10, page e13161, 2010.
- [Dicks2010a] Dicks, M., Button, C. and Davids, K. *Availability of advance visual information constrains association-football goalkeeping performance during penalty kicks*. Perception, vol. 39, n° 8, pages 1111–1124, 2010.
- [Dicks2010b] Dicks, M., Davids, K. and Button, C. *Individual differences in the visual control of intercepting a penalty kick in association*

- football*. Human movement science, vol. 29, n° 3, pages 401–411, 2010.
- [Duarte2012] Duarte, R., Araújo, D., Davids, K., Travassos, B., Gazimba, V. and Sampaio, J. *Interpersonal coordination tendencies shape 1-vs-1 sub-phase performance outcomes in youth soccer*. Journal of Sports Sciences, vol. 30, n° 9, pages 871–877, 2012.
- [Eils2017] Eils, E., Cañal-Bruland, R., Sieverding, L., de Lussanet, M. H. and Zentgraf, K. *Vision adds to haptics when dyads perform a whole-body joint balance task*. Experimental brain research, vol. 235, n° 7, pages 2089–2102, 2017.
- [Esteves2012] Esteves, P. T., Araújo, D., Davids, K., Vilar, L., Travassos, B. and Esteves, C. *Interpersonal dynamics and relative positioning to scoring target of performers in 1 vs. 1 sub-phases of team sports*. Journal of sports sciences, vol. 30, n° 12, pages 1285–1293, 2012.
- [Fadde2019] Fadde, P. J. and Zaichkowsky, L. *Training perceptual-cognitive skills in sports using technology*. Journal of Sport Psychology in Action, vol. 9, n° 4, pages 239–248, 2019.
- [Fajen2003] Fajen, B. R. and Warren, W. H. *Behavioral dynamics of steering, obstacle avoidance, and route selection*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 29, n° 2, page 343, 2003.
- [Fajen2004] Fajen, B. R. and Warren, W. H. *Visual guidance of intercepting a moving target on foot*. Perception, vol. 33, pages 689–715, 2004.
- [Fajen2007] Fajen, B. R. and Warren, W. H. *Behavioral dynamics of intercepting a moving target*. Experimental Brain Research, vol. 180, n° 2, pages 303–319, 2007.
- [Fajen2009] Fajen, B. R., Riley, M. A. and Turvey, M. T. *Information, affordances, and the control of action in sport*. International Journal of Sport Psychology, vol. 40, n° 1, page 79, 2009.
- [Fajen2011] Fajen, B. R., Diaz, G. and Cramer, C. *Reconsidering the role of movement in perceiving action-scaled affordances*. Human Movement Science, vol. 30, n° 3, pages 504–533, 2011.

- [Famose1984] Famose, J.-P. *Le déroulement d'un acte moteur efficace*. In L'educateur sportif; premier degre. Paris : INSEP Publications et Eds Revue EPS, 1984.
- [Farrow2003] Farrow, D. and Abernethy, B. *Do expertise and the degree of perception-action coupling affect natural anticipatory performance?* Perception, vol. 32, n° 9, pages 1127–1139, 2003.
- [Farrow2013] Farrow, D. *Practice-enhancing technology : a review of perceptual training applications in sport*. Sports Technology, vol. 6, n° 4, pages 170–176, 2013.
- [Faure2017] Faure, C., Kulpa, R., Limballe, A. and Bideau, B. *Etude de la cinétique de déplacement lors d'une tâche d'interception en environnement virtuel immersif*. In IGRV 2017, Rennes, 2017.
- [Faure2019] Faure, C., Limballe, A., Sorel, A., Perrin, T., Bideau, B. and Kulpa, R. *Dyadic interference leads to area of uncertainty during face-to-face cooperative interception task*. Manuscript accepted for publication, 2019.
- [Fink2009] Fink, P. W., Foo, P. S. and Warren, W. H. *Catching fly balls in virtual reality : A critical test of the outfielder problem*. Journal of vision, vol. 9, n° 13, pages 14–14, 2009.
- [Fowler1978] Fowler, C. A. and Turvey, M. T. *Skill acquisition : An event approach with special reference to searching for the optimum of a function of several variables*. In Information processing in motor control and learning, pages 1–40. Elsevier, 1978.
- [Franchak2014] Franchak, J. and Adolph, K. *Affordances as probabilistic functions : Implications for development, perception, and decisions for action*. Ecological Psychology, vol. 26, n° 1-2, pages 109–124, 2014.
- [Fribourg2018] Fribourg, R., Argelaguet, F., Hoyet, L. and Lécuyer, A. *Studying the sense of embodiment in VR shared experiences*. In 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pages 273–280. IEEE, 2018.
- [Galantucci2009] Galantucci, B. *Experimental semiotics : A new approach for studying communication as a form of joint action*. Topics in Cognitive Science, vol. 1, n° 2, pages 393–410, 2009.

- [Ganesh2014] Ganesh, G., Takagi, A., Osu, R., Yoshioka, T., Kawato, M. and Burdet, E. *Two is better than one : Physical interactions improve motor performance in humans*. Scientific reports, vol. 4, page 3824, 2014.
- [Gibson1950] Gibson, J. J. The perception of the visual world. Houghton Mifflin, 1950.
- [Gibson1961] Gibson, J. *Ecological optics*. Vision Research, vol. 1, n° 3, pages 253 – 262, 1961.
- [Gibson1966] Gibson, J. J. The senses considered as perceptual systems. Houghton Mifflin, 1966.
- [Gibson1979] Gibson, J. The ecological approach to perception. Boston : Houghton Mifflin, 1979.
- [Gorman2014] Gorman, J. C. *Team Coordination and Dynamics : Two Central Issues*. Current Directions in Psychological Science, vol. 23, n° 5, pages 355–360, 2014.
- [Gray2006] Gray, R. *Vision in flying, driving, and sport*. Seeing spatial form, vol. 1, page 121, 2006.
- [Grehl2015] Grehl, S., Sastuba, M., Donner, M., Ferber, M., Schreiter, F., Mischo, H. and Jung, B. *Towards virtualization of underground mines using mobile robots—from 3D scans to virtual mines*. In 23rd International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection, 2015.
- [Hale2006] Hale, K. S. and Stanney, K. M. *Effects of low stereo acuity on performance, presence and sickness within a virtual environment*. Applied Ergonomics, vol. 37, n° 3, pages 329–339, 2006.
- [Hancock1997] Hancock, P. A. and Manster, M. *Time-to-contact : More than tau alone*. Ecological Psychology, vol. 9, n° 4, pages 265–297, 1997.
- [Handford1997] Handford, C., Davids, K., Bennett, S. and Button, C. *Skill acquisition in sport : Some applications of an evolving practice ecology*. Journal of sports sciences, vol. 15, n° 6, pages 621–640, 1997.
- [Haugeland1989] Haugeland, J. Artificial intelligence : The very idea. MIT press, 1989.

- [Heilig1992] Heilig, M. L. *El cine del futuro : The cinema of the future*. Presence : Teleoperators & Virtual Environments, vol. 1, n° 3, pages 279–294, 1992.
- [Helsen1999] Helsen, W. F. and Starkes, J. L. *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, vol. 13, n° 1, pages 1–27, 1999.
- [Hillis2004] Hillis, J. M., Watt, S. J., Landy, M. S. and Banks, M. S. *Slant from texture and disparity cues : Optimal cue combination*. Journal of vision, vol. 4, n° 12, pages 1–1, 2004.
- [Hosmer2000] Hosmer, D., Lemeshow, S., Shewhart, W. and Wilks, S. Applied logistic regression, second edition. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [Howard2012] Howard, I. P. Perceiving in depth, volume 1 : basic mechanisms. Oxford University Press, 2012.
- [Howarth2008] Howarth, P. A. and Hodder, S. G. *Characteristics of habituation to motion in a virtual environment*. Displays, vol. 29, n° 2, pages 117–123, 2008.
- [Huang2007] Huang, C. and Hu, L.-H. *Kinematic analysis of volleyball jump topspin and float serve*. In ISBS-Conference Proceedings Archive, volume 1, pages 333–336, 2007.
- [Hyman1953] Hyman, R. *Stimulus information as a determinant of reaction time*. Journal of experimental psychology, vol. 45, n° 3, page 188, 1953.
- [Issartel2007] Issartel, J., Marin, L. and Cadopi, M. *Unintended interpersonal co-ordination : can we march to the beat of our own drum ?* Neuroscience letters, vol. 411, n° 3, pages 174–179, 2007.
- [Jackson2006] Jackson, R. C., Warren, S. and Abernethy, B. *Anticipation skill and susceptibility to deceptive movement*. Acta psychologica, vol. 123, n° 3, pages 355–371, 2006.
- [Jeunet2018] Jeunet, C., Albert, L., Argelaguet, F. and Lécuyer, A. *”Do You Feel in Control ?” : Towards Novel Approaches to Characterise, Manipulate and Measure the Sense of Agency in*

- Virtual Environments*. IEEE transactions on visualization and computer graphics, vol. 24, n° 4, pages 1486–1495, 2018.
- [Joslin2004] Joslin, C., Di Giacomo, T. and Magnenat-Thalmann, N. *Collaborative virtual environments : from birth to standardization*. IEEE Communications Magazine, vol. 42, n° 4, pages 28–33, 2004.
- [Kelso1981] Kelso, S. J., Holt, K. G., Rubin, P. and Kugler, P. N. *Patterns of human interlimb coordination emerge from the properties of non-linear, limit cycle oscillatory processes : Theory and data*. Journal of motor behavior, vol. 13, n° 4, pages 226–261, 1981.
- [Keshavarz2016] Keshavarz, B. *Exploring behavioral methods to reduce visually induced motion sickness in virtual environments*. In International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality, pages 147–155. Springer, 2016.
- [Kilteni2012] Kilteni, K., Groten, R. and Slater, M. *The sense of embodiment in virtual reality*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 21, n° 4, pages 373–387, 2012.
- [Kim2016] Kim, H. R., Angelaki, D. E. and DeAngelis, G. C. *The neural basis of depth perception from motion parallax*. Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences, vol. 371, n° 1697, page 20150256, 2016.
- [Knoblich2003] Knoblich, G. and Jordan, J. S. *Action coordination in groups and individuals : Learning anticipatory control*. Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition, vol. 29, n° 5, page 1006, 2003.
- [Kober2012] Kober, S. E., Kurzmann, J. and Neuper, C. *Cortical correlate of spatial presence in 2D and 3D interactive virtual reality : an EEG study*. International Journal of Psychophysiology, vol. 83, n° 3, pages 365–374, 2012.
- [Kugler2015] Kugler, P. N. and Turvey, M. T. *Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement*. Routledge, 2015.
- [Laszlo1977] Laszlo, J. I. and Livesey, J. P. *Task Complexity, Accuracy, and Reaction Time*. Journal of Motor Behavior, vol. 9, n° 2, pages 171–177, 1977. PMID : 23947496.

- [Laurent1996] Laurent, M. and Temprado, J. *Apprentissage et controle du mouvement dans les APS. Quelle(s) theorie(s) pour quelle(s) pratique(s)*. In Recherche et Pratique des APS, Dossiers EPS, volume 28, pages 67–77. Paris : Editions "Revue EPS", 1996.
- [Ledouit2013] Ledouit, S., Casanova, R., Zaal, F. T. and Bootsma, R. J. *Prospective control in catching : the persistent angle-of-approach effect in lateral interception*. PLoS one, vol. 8, n° 11, page e80827, 2013.
- [Ledouit2015] Ledouit, S. *Modélisation des relations information-mouvement mises en oeuvre lors de l'interception d'un mobile*. Thèse, Aix-Marseille, 2015.
- [Lee1976] Lee, D. N. *A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision*. Perception, vol. 5, n° 4, pages 437–459, 1976.
- [Lee1981] Lee, D. N. and Reddish, P. E. *Plummeting gannets : A paradigm of ecological optics*. Nature, vol. 293, n° 5830, page 293, 1981.
- [Lee1985] Lee, D. N. and Young, D. S. *Visual timing of interceptive action*. In Brain mechanisms and spatial vision, pages 1–30. Springer, 1985.
- [Lee1998] Lee, D. N. *Guiding movement by coupling taus*. Ecological psychology, vol. 10, n° 3-4, pages 221–250, 1998.
- [Lenoir2002] Lenoir, M., Musch, E., Thiery, E. and SAVELSBERGH, G. *Rate of change of angular bearing as the relevant property in a horizontal interception task during locomotion*. JOURNAL OF MOTOR BEHAVIOR, vol. 34, n° 4, pages 385–401, 2002.
- [Lenoir2005] Lenoir, M., Vansteenkiste, J., Vermeulen, J. and de Clercq, D. *Effects of contrasting colour patterns of the ball in the volleyball reception*. Journal of sports sciences, vol. 23, pages 871–879, Août 2005.
- [Lepora2015] Lepora, N. F. and Pezzulo, G. *Embodied choice : how action influences perceptual decision making*. PLoS computational biology, vol. 11, n° 4, page e1004110, 2015.
- [Lintern1990] Lintern, G., Roscoe, S. N. and Sivier, J. E. *Display Principles, Control Dynamics, and Environmental Factors in Pi-*

- lot Training and Transfer*. Human Factors, vol. 32, n° 3, pages 299–317, 1990.
- [Loomis1999] Loomis, J. M., Blascovich, J. J. and Beall, A. C. *Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology*. Behavior research methods, instruments, & computers, vol. 31, n° 4, pages 557–564, 1999.
- [Lorains2009] Lorains, M. and MacMahon, C. *Adapting the functional overreaching principle to cognitive skills : Expertise differences using speed manipulations in a video-based decision-making task*. In Proceedings of the 12th World Congress of Sport Psychology (ISSP). Marrakesh Morocco, 2009.
- [Lorains2013] Lorains, M. *Decision making in sport : applying the above real time training method*. Thèse, Victoria University, 2013.
- [Lynch2018] Lynch, S. *Visual perception of human movement during walking task interactions*. Theses, Université Rennes 2, Octobre 2018.
- [Mann2007] Mann, D. T., Williams, A. M., Ward, P. and Janelle, C. M. *Perceptual-cognitive expertise in sport : A meta-analysis*. Journal of Sport and Exercise Psychology, vol. 29, n° 4, pages 457–478, 2007.
- [Marsh2006] Marsh, K. L., Richardson, M. J., Baron, R. M. and Schmidt, R. *Contrasting approaches to perceiving and acting with others*. Ecological Psychology, vol. 18, n° 1, pages 1–38, 2006.
- [Marsh2009] Marsh, K. L., Richardson, M. J. and Schmidt, R. C. *Social connection through joint action and interpersonal coordination*. Topics in Cognitive Science, vol. 1, n° 2, pages 320–339, 2009.
- [Mazuryk1996] Mazuryk, T. and Gervautz, M. *Virtual Reality History, Applications, Technology and Future*. Rapport technique TR-186-2-96-06, Institute of Computer Graphics and Algorithms, Vienna University of Technology, Favoritenstrasse 9-11/186, A-1040 Vienna, Austria, Février 1996. human contact : technical-report@cg.tuwien.ac.at.
- [Mazyn2004] Mazyn, L. I., Lenoir, M., Montagne, G. and Savelsbergh, G. J. *The contribution of stereo vision to one-handed catching*. Experimental brain research, vol. 157, n° 3, pages 383–390, 2004.

- [McGarry2006] McGarry, T. *Identifying patterns in squash contests using dynamical analysis and human perception*. International Journal of Performance Analysis in Sport, vol. 6, n° 2, pages 134–147, 2006.
- [McMenemy2007] McMenemy, K. and Ferguson, R. S. *A hitchhiker's guide to virtual reality*. CRC Press, 2007.
- [Meehan2003] Meehan, M., Razzaque, S., Whitton, M. C. and Brooks, F. P. *Effect of latency on presence in stressful virtual environments*. In IEEE Virtual Reality, 2003. Proceedings., pages 141–148. IEEE, 2003.
- [Mestre1992] Mestre, D. R. *Chapter 18 Visual Perception of Self-Motion*. In Proteau, L. and Elliott, D., Eds., *Vision and Motor Control*, volume 85 of *Advances in Psychology*, pages 421 – 438. North-Holland, 1992.
- [Miles2010] Miles, L. K., Griffiths, J. L., Richardson, M. J. and Macrae, C. N. *Too late to coordinate : Contextual influences on behavioral synchrony*. European Journal of Social Psychology, vol. 40, n° 1, pages 52–60, 2010.
- [Miles2012] Miles, H. C., Pop, S. R., Watt, S. J., Lawrence, G. P. and John, N. W. *A review of virtual environments for training in ball sports*. Computers & Graphics, vol. 36, n° 6, pages 714–726, 2012.
- [Miles2013] Miles, H. C., Pop, S. R., Watt, S. J., Lawrence, G. P., John, N. W., Perrot, V., Mallet, P. and Mestre, D. R. *Investigation of a Virtual Environment for Rugby Skills Training*. In Cyberworlds (CW), 2013 International Conference on, pages 56–63. IEEE, 2013.
- [Miles2014] Miles, H. C., Pop, S. R., Watt, S. J., Lawrence, G. P., John, N. W., Perrot, V., Mallet, P., Mestre, D. R. and Morgan, K. *Efficacy of a virtual environment for training ball passing skills in rugby*. In Transactions on Computational Science XXIII, pages 98–117. Springer, 2014.
- [Mojtahedi2017] Mojtahedi, K., Fu, Q. and Santello, M. *On the role of physical interaction on performance of object manipulation by dyads*. Frontiers in human neuroscience, vol. 11, page 533, 2017.

- [Müller2006] Müller, S., Abernethy, B. and Farrow, D. *How do world-class cricket batsmen anticipate a bowler's intention?* The quarterly journal of experimental psychology, vol. 59, n° 12, pages 2162–2186, 2006.
- [Nahab2010] Nahab, F. B., Kundu, P., Gallea, C., Kakareka, J., Pursley, R., Pohida, T., Miletta, N., Friedman, J. and Hallett, M. *The neural processes underlying self-agency.* Cerebral cortex, vol. 21, n° 1, pages 48–55, 2010.
- [Néda2000] Néda, Z., Ravasz, E., Brechet, Y., Vicsek, T. and Barabási, A.-L. *Self-organizing processes : The sound of many hands clapping.* Nature, vol. 403, n° 6772, page 849, 2000.
- [Neisser2014] Neisser, U. *Cognitive psychology : Classic edition.* Psychology Press, 2014.
- [Newell1986] Newell, K. *Constraints on the development of coordination.* Motor development in children : Aspects of coordination and control, 1986.
- [Niehorster2017] Niehorster, D. C., Li, L. and Lappe, M. *The accuracy and precision of position and orientation tracking in the HTC vive virtual reality system for scientific research.* i-Perception, vol. 8, n° 3, page 2041669517708205, 2017.
- [Nowak2003] Nowak, K. L. and Biocca, F. *The effect of the agency and anthropomorphism on users' sense of telepresence, copresence, and social presence in virtual environments.* Presence : Teleoperators & Virtual Environments, vol. 12, n° 5, pages 481–494, 2003.
- [Orban de Xivry2017] Orban de Xivry, J.-J., Legrain, V. and Lefevre, P. *Overlap of movement planning and movement execution reduces reaction time.* Journal of neurophysiology, vol. 117, pages 117–122, Janvier 2017.
- [Oudejans1996] Oudejans, R. R., Michaels, C. F., van Dort, B. and Frissen, E. J. *To cross or not to cross : The effect of locomotion on street-crossing behavior.* Ecological psychology, vol. 8, n° 3, pages 259–267, 1996.
- [Palut2005] Palut, Y. and Zanone, P.-G. *A dynamical analysis of tennis : Concepts and data.* Journal of sports sciences, vol. 23, n° 10, pages 1021–1032, 2005.

- [Pan2018] Pan, X. and Hamilton, A. F. d. C. *Why and how to use virtual reality to study human social interaction : The challenges of exploring a new research landscape*. British journal of psychology (London, England : 1953), vol. 109, pages 395–417, Août 2018.
- [Passos2018] Passos, P., Milho, J. and Button, C. *Quantifying synergies in two-versus-one situations in team sports : an example from Rugby Union*. Behavior research methods, vol. 50, n° 2, pages 620–629, 2018.
- [Peper1994] Peper, L., Bootsma, R. J., Mestre, D. R. and Bakker, F. C. *Catching balls : how to get the hand to the right place at the right time*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 20, n° 3, page 591, 1994.
- [Pepping1997] Pepping, G.-J. and Li, F.-X. *Perceiving action boundaries in the volleyball block*. In Schmuckler, S. A. and Kennedy, J. M., Eds., Studies in perception and action IV, pages 137–140. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates., 1997.
- [Petit2008] Petit, J.-P., Ripoll, H. *et al.* *Scene perception and decision making in sport simulation : a masked priming investigation*. international Journal of sport psychology, vol. 39, n° 1, pages 1–19, 2008.
- [Porras-Garcia2019] Porras-Garcia, B., Ferrer-Garcia, M., Ghita, A., Moreno, M., López-Jiménez, L., Vallvé-Romeu, A., Serrano-Troncoso, E. and Gutiérrez-Maldonado, J. *The influence of gender and body dissatisfaction on body-related attentional bias : An eye-tracking and virtual reality study*. International Journal of Eating Disorders, 2019.
- [Prevost2002] Prevost, P. *Stratégies d’anticipation et rôle du contexte dans les tâches visuo-motrices*. Mémoire de doctorat en Sciences, Université Paris XI, UFR Scientifique d’Orsay, 2002.
- [Ramenzoni2011] Ramenzoni, V. C., Davis, T. J., Riley, M. A., Shockley, K. and Baker, A. A. *Joint action in a cooperative precision task : nested processes of intrapersonal and interpersonal coordination*. Experimental brain research, vol. 211, n° 3-4, pages 447–457, 2011.

- [Ramenzoni2012] Ramenzoni, V. C., Riley, M. A., Shockley, K. and Baker, A. A. *Interpersonal and intrapersonal coordinative modes for joint and single task performance*. Human Movement Science, vol. 31, n° 5, pages 1253–1267, 2012.
- [RCore-Team2016] RCore-Team. *R : A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2013, 2016.
- [Rebenitsch2016] Rebenitsch, L. and Owen, C. *Review on cybersickness in applications and visual displays*. Virtual Reality, vol. 20, n° 2, pages 101–125, 2016.
- [Regan1993] Regan, D. and Hamstra, S. *Dissociation of discrimination thresholds for time to contact and for rate of angular expansion*. Vision research, vol. 33, n° 4, pages 447–462, 1993.
- [Regan2000] Regan, D. and Gray, R. *Visually guided collision avoidance and collision achievement*. Trends in cognitive sciences, vol. 4, n° 3, pages 99–107, 2000.
- [Richardson2008] Richardson, M. J., Lopresti-Goodman, S., Mancini, M., Kay, B. and Schmidt, R. *Comparing the attractor strength of intra-and interpersonal interlimb coordination using cross-recurrence analysis*. Neuroscience Letters, vol. 438, n° 3, pages 340–345, 2008.
- [Richardson2010] Richardson, M. J., Marsh, K. L. and Schmidt, R. *Challenging the egocentric view of coordinated perceiving, acting, and knowing*. The mind in context, pages 307–333, 2010.
- [Richardson2011] Richardson, M. J., Harrison, S. J., May, R., Kallen, R. W. and Schmidt, R. *Self-organized complementary coordination : Dynamics of an interpersonal collision-avoidance task*. In BIO Web of Conferences, volume 1, page 00075. EDP Sciences, 2011.
- [Richardson2015] Richardson, M. J., Harrison, S. J., Kallen, R. W., Walton, A., Eiler, B. A., Saltzman, E. and Schmidt, R. *Self-organized complementary joint action : Behavioral dynamics of an interpersonal collision-avoidance task*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 41, n° 3, page 665, 2015.

- [Rigoli2015] Rigoli, L., Romero, V., Shockley, K. D., Funke, G. J., Strang, A. J. and Richardson, M. J. *Effects of Complementary Control on the Coordination Dynamics of Joint-Action*. In CogSci, 2015.
- [Romero2015] Romero, V., Kallen, R., Riley, M. A. and Richardson, M. J. *Can discrete joint action be synergistic? Studying the stabilization of interpersonal hand coordination*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 41, n° 5, page 1223, 2015.
- [Roth2016] Roth, D., Lugrin, J.-L., Galakhov, D., Hofmann, A., Bente, G., Latoschik, M. E. and Fuhrmann, A. *Avatar realism and social interaction quality in virtual reality*. In Virtual Reality (VR), 2016 IEEE, pages 277–278. IEEE, 2016.
- [Rousset2018] Rousset, T., Bourdin, C., Goulon, C., Monnoyer, J. and Vercher, J.-L. *Misperception of egocentric distances in virtual environments : More a question of training than a technological issue ?* Displays, vol. 52, pages 8–20, 2018.
- [Rowe2001] Rowe, R. M. and McKenna, F. P. *Skilled anticipation in real-world tasks : Measurement of attentional demands in the domain of tennis*. Journal of Experimental Psychology : Applied, vol. 7, n° 1, page 60, 2001.
- [Sanchez-Vives2005] Sanchez-Vives, M. V. and Slater, M. *From presence to consciousness through virtual reality*. Nature Reviews Neuroscience, vol. 6, n° 4, pages 332–339, 2005.
- [Savelsbergh1991] Savelsbergh, G., Whiting, H. and Bootsma, R. J. *Grasping tau*. Journal of experimental psychology : human perception and performance, vol. 17, n° 2, page 315, 1991.
- [Savelsbergh2002] Savelsbergh, G. J., Williams, A. M., Kamp, J. V. D. and Ward, P. *Visual search, anticipation and expertise in soccer goalkeepers*. Journal of sports sciences, vol. 20, n° 3, pages 279–287, 2002.
- [Savelsbergh2005] Savelsbergh, G. J., Van der Kamp, J., Williams, A. M. and Ward, P. *Anticipation and visual search behaviour in expert soccer goalkeepers*. Ergonomics, vol. 48, n° 11-14, pages 1686–1697, 2005.

- [Schmidt1990] Schmidt, R. C., Carello, C. and Turvey, M. T. *Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people*. Journal of experimental psychology : human perception and performance, vol. 16, n° 2, page 227, 1990.
- [Schmidt1993] Schmidt, R. A. Apprentissage moteur et performance. Vigot Paris, 1993.
- [Schmidt1994] Schmidt, R. and Turvey, M. T. *Phase-entrainment dynamics of visually coupled rhythmic movements*. Biological cybernetics, vol. 70, n° 4, pages 369–376, 1994.
- [Schmidt2008] Schmidt, R. C. and Richardson, M. J. *Dynamics of Interpersonal Coordination*. In Fuchs, A. and Jirsa, V. K., Eds., Understanding Complex Systems, pages 281–308. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [Schmidt2011] Schmidt, R., Fitzpatrick, P., Caron, R. and Mergeche, J. *Understanding social motor coordination*. Human movement science, vol. 30, n° 5, pages 834–845, 2011.
- [Schmitz2017] Schmitz, L. *Co-representation and Communication in Joint Action*. Thèse, Doctoral dissertation]. Budapest : Central European University, 2017.
- [Sebanz2006] Sebanz, N., Bekkering, H. and Knoblich, G. *Joint action : bodies and minds moving together*. Trends in cognitive sciences, vol. 10, n° 2, pages 70–76, 2006.
- [Seifert2017] Seifert, L., Lardy, J., Bourbousson, J., Adé, D., Nordez, A., Thouvarecq, R. and Saury, J. *Interpersonal coordination and individual organization combined with shared phenomenological experience in rowing performance : two case studies*. Frontiers in psychology, vol. 8, page 75, 2017.
- [Shim2005] Shim, J., Carlton, L. G., Chow, J. W. and Chae, W.-S. *The use of anticipatory visual cues by highly skilled tennis players*. Journal of motor behavior, vol. 37, n° 2, pages 164–175, 2005.
- [Shim2006] Shim, J., Carlton, L. G. and Kwon, Y.-H. *Perception of kinematic characteristics of tennis strokes for anticipating stroke type and direction*. Research quarterly for exercise and sport, vol. 77, n° 3, pages 326–339, 2006.

- [Shockley2015] Shockley, K. and Riley, M. A. *Interpersonal Couplings in Human Interactions*. In Webber, Jr., C. L. and Marwan, N., Eds., *Recurrence Quantification Analysis : Theory and Best Practices*, pages 399–421. Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [Silva2013] Silva, P., Garganta, J., Araújo, D., Davids, K. and Aguiar, P. *Shared Knowledge or Shared Affordances ? Insights from an Ecological Dynamics Approach to Team Coordination in Sports*. *Sports Medicine*, vol. 43, n° 9, pages 765–772, Sep 2013.
- [Slater1996] Slater, M., Linakis, V., Usoh, M. and Kooper, R. *Immersion, presence and performance in virtual environments : An experiment with tri-dimensional chess*. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 163–172. ACM, 1996.
- [Slater1998] Slater, M., Steed, A., McCarthy, J. and Maringelli, F. *The influence of body movement on subjective presence in virtual environments*. *Human factors*, vol. 40, pages 469–477, Septembre 1998.
- [Slater2009] Slater, M. *Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, vol. 364, n° 1535, pages 3549–3557, 2009.
- [Sofianidis2012] Sofianidis, G., Hatzitaki, V., Grouios, G., Johannsen, L. and Wing, A. *Somatosensory driven interpersonal synchrony during rhythmic sway*. *Human movement science*, vol. 31, n° 3, pages 553–566, 2012.
- [Starkes1993] Starkes, J. and Allard, F. *Cognitive issues in motor expertise*, volume 102. Elsevier, 1993.
- [Starkes1994] Starkes, J. L. and Lindley, S. *Can we hasten expertise by video simulations ?* *Quest*, vol. 46, n° 2, pages 211–222, 1994.
- [Starkes2000] Starkes, J. *The road to expertise : Is practice the only determinant ?* *International Journal of Sport Psychology*, vol. 31, n° 4, pages 431–451, 2000.
- [Stevens1974] Stevens, P. S. *Patterns in nature*. Boston : Little, Brown, 1974.

- [Stinson2014] Stinson, C. and Bowman, D. A. *Feasibility of training athletes for high-pressure situations using virtual reality*. IEEE transactions on visualization and computer graphics, vol. 20, n° 4, pages 606–615, 2014.
- [Stone2018] Stone, J. A., Strafford, B. W., North, J. S., Toner, C. and Davids, K. *Effectiveness and efficiency of virtual reality designs to enhance athlete development : an ecological dynamics perspective*. Movement & Sport Sciences-Science & Motricité, n° 102, pages 51–60, 2018.
- [Strang2014] Strang, A. J., Funke, G. J., Russell, S. M., Dukes, A. W. and Middendorf, M. S. *Physio-behavioral coupling in a cooperative team task : contributors and relations*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 40, n° 1, page 145, 2014.
- [Sutherland1965] Sutherland, I. E. *The ultimate display*. Multimedia : From Wagner to virtual reality, pages 506–508, 1965.
- [Sutherland1968] Sutherland, I. E. *A head-mounted three dimensional display*. In Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I, pages 757–764. ACM, 1968.
- [Tarr2002] Tarr, M. J. and Warren, W. H. *Virtual reality in behavioral neuroscience and beyond*. nature neuroscience, vol. 5, n° 11s, page 1089, 2002.
- [Temprado2001] Temprado, J.-J. and Montagne, G. Les coordinations perceptivo-motrices : introduction aux approches écologique et dynamique du couplage perception-action. A. Colin, 2001.
- [Tenenbaum2003] Tenenbaum, G. *Expert athletes : An integrated approach to decision making*. Expert performance in sports, pages 191–218, 2003.
- [Thiffault1974] Thiffault, C. *Tachistoscopic training and its effect upon visual perceptual speed of ice-hockey players*. Thèse, Thesis (Ph. D.)—University of Southern California, 1974.
- [Thiffault1980] Thiffault, C. *Construction et validation d'une mesure de la rapidité de la pensée tactique des joueurs de hockey sur glace*. Psychology of motor behaviour and sport. Champaign, IL : Human Kinetics, pages 643–649, 1980.

- [Travassos2012] Travassos, B., Araujo, D., Davids, K., Vilar, L., Esteves, P. and Vanda, C. *Informational constraints shape emergent functional behaviours during performance of interceptive actions in team sports*. *Psychology of Sport and Exercise*, vol. 13, n° 2, pages 216–223, 2012.
- [Turvey1977] Turvey, M. *Contrasting orientations to the theory of visual information processing*. *Psychological Review*, vol. 84, n° 1, pages 67–88, 1977.
- [Turvey1992] Turvey, M. T. *Affordances and prospective control : An outline of the ontology*. *Ecological psychology*, vol. 4, n° 3, pages 173–187, 1992.
- [Turvey1995] Turvey, M. and Shaw, R. E. *Toward an ecological physics and a physical psychology*. *The science of the mind : 2001 and beyond*, pages 144–169, 1995.
- [Turvey1999] Turvey, M. and Shaw, R. E. *Ecological foundations of cognition. I : Symmetry and specificity of animal-environment systems*. *Journal of Consciousness Studies*, vol. 6, n° 11-12, pages 95–110, 1999.
- [Usoh2000] Usoh, M., Catena, E., Arman, S. and Slater, M. *Using Presence Questionnaires in Reality*. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 9, n° 5, pages 497–503, 2000.
- [Vaeyens2007] Vaeyens, R., Lenoir, M., Williams, A. M. and Philippaerts, R. M. *Mechanisms underpinning successful decision making in skilled youth soccer players : An analysis of visual search behaviors*. *Journal of motor behavior*, vol. 39, n° 5, pages 395–408, 2007.
- [Van der Kamp2008] Van der Kamp, J., Rivas, F., Van Doorn, H. and Savelsbergh, G. *Ventral and dorsal system contributions to visual anticipation in fast ball sports*. *International Journal of Sport Psychology*, vol. 39, n° 2, page 100, 2008.
- [van der Meer1997] van der Meer, A. L. *Visual guidance of passing under a barrier*. *Infant and Child Development*, vol. 6, n° 3-4, pages 149–158, 1997.
- [van Opstal2018] van Opstal, A., Benerink, N. H., Zaal, F. T., Casanova, R. and Bootsma, R. J. *Information-Based Social Coordination*

- Between Players of Different Skill in Doubles Pong*. *Frontiers in Psychology*, vol. 9, page 1731, 2018.
- [van Ulzen2008] van Ulzen, N. R., Lamoth, C. J., Daffertshofer, A., Semin, G. R. and Beek, P. J. *Characteristics of instructed and uninstructed interpersonal coordination while walking side-by-side*. *Neuroscience letters*, vol. 432, n° 2, pages 88–93, 2008.
- [Varlet2013] Varlet, M., Filippeschi, A., Ben-sadoun, G., Ratto, M., Marin, L., Ruffaldi, E. and Bardy, B. G. *Virtual reality as a tool to learn interpersonal coordination : Example of team rowing*. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 22, n° 3, pages 202–215, 2013.
- [Vesper2009] Vesper, C., Soutschek, A. and Schubö, A. *Motion coordination affects movement parameters in a joint pick-and-place task*. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 62, n° 12, pages 2418–2432, 2009.
- [Vesper2014] Vesper, C. and Richardson, M. J. *Strategic communication and behavioral coupling in asymmetric joint action*. *Experimental brain research*, vol. 232, n° 9, pages 2945–2956, 2014.
- [Vesper2017] Vesper, C., Abramova, E., Butepage, J., Ciardo, F., Crossey, B., Effenberg, A., Hristova, D., Karlinsky, A., McEllin, L., Nijssen, S. R. R., Schmitz, L. and Wahn, B. *Joint Action : Mental Representations, Shared Information and General Mechanisms for Coordinating with Others*. *Frontiers in Psychology*, vol. 7, page 2039, 2017.
- [Vicaria2016] Vicaria, I. M. and Dickens, L. *Meta-analyses of the intra-and interpersonal outcomes of interpersonal coordination*. *Journal of Nonverbal Behavior*, vol. 40, n° 4, pages 335–361, 2016.
- [Vignais2009] Vignais, N., Bideau, B., Craig, C., Brault, S., Multon, F., Delamarche, P. and Kulpa, R. *Does the Level of Graphical Detail of a Virtual Handball Thrower Influence a Goalkeeper's Motor Response ?* *Journal of sports science & medicine*, vol. 8, pages 501–508, 2009.
- [Vignais2010] Vignais, N., Kulpa, R., Craig, C., Brault, S., Multon, F. and Bideau, B. *Influence of the graphical levels of detail of a virtual thrower on the perception of the movement*. *Presence :*

- Teleoperators and Virtual Environments, vol. 19, n° 3, pages 243–252, 2010.
- [Vignais2015] Vignais, N., Kulpa, R., Brault, S., Presse, D. and Bideau, B. *Which technology to investigate visual perception in sport : Video vs. virtual reality.* Human movement science, vol. 39, pages 12–26, 2015.
- [Von Eckardt1993] Von Eckardt, B. *What is cognitive science?* MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1993.
- [Wahn2017] Wahn, B., Kingstone, A. and König, P. *Two Trackers Are Better than One : Information about the Co-actor's Actions and Performance Scores Contribute to the Collective Benefit in a Joint Visuospatial Task.* Frontiers in psychology, vol. 8, page 669, 2017.
- [Warren1984] Warren, W. H. *Perceiving affordances : Visual guidance of stair climbing.* Journal of experimental psychology : Human perception and performance, vol. 10, n° 5, page 683, 1984.
- [Warren1987] Warren, W. H. and Whang, S. *Visual guidance of walking through apertures : body-scaled information for affordances.* Journal of experimental psychology. Human perception and performance, vol. 13, pages 371–383, Août 1987.
- [Warren1988] Warren, W. H. *Action modes and laws of control for the visual guidance of action.* In *Advances in psychology*, volume 50, pages 339–379. Elsevier, 1988.
- [Warren2006] Warren, W. H. *The dynamics of perception and action.* Psychol Rev, vol. 113, n° 2, pages 358–389, Apr 2006.
- [Warren2008] Warren, W. and Fajen, B. *Behavioral dynamics of visually guided locomotion.* *Coordination : neural, behavioral and social dynamics*, pages 45–75, 2008.
- [Watson2011] Watson, G., Brault, S., Kulpa, R., Bideau, B., Butterfield, J. and Craig, C. *Judging the passability of dynamic gaps in a virtual rugby environment.* Human Movement Science, vol. 30, n° 5, pages 942–956, 2011.
- [Williams1994a] Williams, A. M., Davids, K., Burwitz, L. and Williams, J. G. *Visual search strategies in experienced and inexperienced soccer players.* Research quarterly for exercise and sport, vol. 65, n° 2, pages 127–135, 1994.

- [Williams1994b] Williams, A., Davids, K. and Burwitz, L. *Ecological validity and visual search research in sport*. Journal of Sport and Exercise Psychology S, vol. 16, page 22, 1994.
- [Williams1999] Williams, A. M., Davids, K. and Williams, J. G. Visual perception and action in sport. Taylor & Francis, 1999.
- [Williams2002] Williams, A. M., Vickers, J. and Rodrigues, S. *The effects of anxiety on visual search, movement kinematics, and performance in table tennis : A test of Eysenck and Calvo's processing efficiency theory*. Journal of Sport and Exercise Psychology, vol. 24, n° 4, pages 438–455, 2002.
- [Williams2004] Williams, A. M., Ward, P., Smeeton, N. J. and Allen, D. *Developing anticipation skills in tennis using on-court instruction : Perception versus perception and action*. Journal of Applied Sport Psychology, vol. 16, n° 4, pages 350–360, 2004.
- [Wing2014] Wing, A. M., Endo, S., Bradbury, A. and Vorberg, D. *Optimal feedback correction in string quartet synchronization*. Journal of The Royal Society Interface, vol. 11, n° 93, page 20131125, 2014.
- [Wood2003] Wood, J. N. and Grafman, J. *Human prefrontal cortex : processing and representational perspectives*. Nature reviews neuroscience, vol. 4, n° 2, page 139, 2003.
- [Zaal2003] Zaal, F. T. and Michaels, C. F. *The information for catching fly balls : judging and intercepting virtual balls in a CAVE*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 29, n° 3, page 537, 2003.

Table des figures

1	29 avril 2018, Grand Prix d'Azerbaïdjan (Bakou). Lors du 40 ^{ème} tour de piste, alors qu'ils se disputent la 4 ^{ème} place, Daniel Ricciardo (Red Bull Racing) vient percuter son coéquipier Max Verstappen. Si l'origine de l'accident reste difficile à identifier (les deux pilotes semblent avoir chacun leurs torts), l'issue est en revanche sans appel : abandons simultanés des deux pilotes. Photographie : Fox Sports.	2
2	Modèle de représentation du traitement de l'information dans l'approche cognitive. D'après [Famose1984]	8
3	Le cycle perception-action au regard de la dynamique comportementale. Adapté d'après [Warren2006].	12
4	Évolution du champ optique en fonction de la position de l'observateur. Le passage de la position assise à debout (et vice versa) induit des changements dans le flux optique perçu, et la perception de l'observateur est modifiée. D'après [Gibson1979].	18
5	Flux optique perçu par le pilote d'un avion : A. regardant au loin, dans la direction du mouvement, B. regardant à droite, perpendiculairement à la direction du mouvement, et C. lors d'une situation d'atterrissage. D'après [Gibson1979].	19
6	Une sphère rigide de diamètre L bouge à une vitesse $V(t)$ le long d'une ligne passant par le centre $N1$ de l'œil de l'observateur. À l'instant t , la distance du centre de la sphère au point $N1$ est $D(t)$, et $\theta(t)$ correspond à l'angle visuel. $l(t)$ correspond à la projection rétinienne de la sphère, et $v(t)$ la vitesse d'expansion de $l(t)$ sur la rétine. Adapté de [Regan1993].	20
7	Définition des variables optiques lors de l'interception d'un agent se déplaçant librement dans un plan. θ représente l'angle de relèvement de la cible, ϕ la direction de déplacement de l'agent et β l'angle de gisement. D'après [Ledouit2015].	22

8	Une même affordance (l'escalier) suggère deux manières de réaliser la tâche, pour deux individus aux caractéristiques différentes : ici, en marchant pour l'homme, en "escaladant" pour l'enfant.	25
9	Une même affordance (la chaise) suggère deux actions différentes, en fonction de la situation : ici, s'asseoir pour lire un livre, ou la saisir et la lancer sur quelqu'un.	26
10	A. Pourcentage de jugement du caractère "montable" de la marche, en fonction de la hauteur de la marche (en pouces). B. Pourcentage de jugement du caractère "montable" de la marche, en fonction du ratio entre la hauteur de la marche et la longueur de la jambe du sujet. D'après [Warren1984]	27
11	Affordance représentée comme : A. une catégorisation d'actions. Le point critique divise l'environnement en deux espaces distincts où l'action est soit possible, soit impossible, et B. une fonction de probabilités. La fonction définit la probabilité de succès pour chaque unité de l'environnement. D'après [Franchak2014].	29
12	"Clapping" de l'équipe d'Islande et de ses supporters durant l'Euro 2016 de football.	32
13	Représentation du setup expérimental utilisé : A. pour un individu et B. pour deux individus. La figure C. représente la tâche effectuée : les deux individus doivent déplacer le stimulus informatique entre leurs cibles respectives, tout en évitant les collisions, et sans communication verbale. D'après [Richardson2015]	35
14	Conditions expérimentales utilisées par [Mojtahedi2017], mettant en jeu une tâche réalisée bi-manuellement (Bi1, Bi2), avec deux mains dominantes (D1-D2), deux mains non-dominantes (ND1-ND2), et enfin une main dominante et une main non dominante (D1-ND2, ND1-D2).	36
15	Distribution du regard durant la tâche de recherche de cibles d'une dyade chez Brennan et al. (2008), dans des conditions de : A. communication orale uniquement, B. regard partagé + regard partagé, C. communication orale uniquement, et D. aucune information partagée. Les fixations d'un participant sont affichées en rouge, celles de l'autre participant en bleu. D'après [Brennan2008].	41
16	Exemples de situations d'interférence entre partenaires : A. dans une réception de balle en baseball, et B. lors d'une réception de balle en volley-ball.	42

17	Deux exemples de systèmes de technologie immersive : A. avec un sujet portant un casque de réalité virtuelle, et B. avec un sujet plongé dans une salle immersive. La salle immersive, bien que plus onéreuse et complexe à mettre en place, possède l'avantage de permettre un mouvement totalement libre du participant, la possibilité de voir son propre corps, ainsi que des résolutions graphiques et niveaux de détails supérieurs aux casques de RV [Grehl2015].	47
18	Exemple d'interaction entre deux participants dans un environnement virtuel collaboratif. D'après [Fribourg2018].	58
19	Architecture logicielle mise en place pour permettre la synchronisation des actions des participants et la création d'un monde virtuel collaboratif unique et partagé par tous.	60
20	Représentation des deux systèmes de réalité virtuelle utilisés dans cette thèse : A. un casque de réalité virtuelle de type HTC Vive (champ de vision = 110°, résolution graphique = 2160*1200 pixels); et B. une salle immersive de type CAVE (salle Immersia de Rennes, dimensions (L*I*h) = 9,6*2,88*3,1 m, résolution graphique = 1920*1200 pixels).	60
21	Principe simplifié de fonctionnement du modèle client-serveur utilisé dans cette thèse : le client fournit des informations sur son état, et envoie des requêtes au serveur. En retour, le serveur envoie une réponse sur l'état global du système et des autres clients, à tout instant.	61
22	Représentation de l'avatar utilisé lors de l'interaction à plusieurs individus avec les casques de réalité virtuelle HTC Vive. La position et l'orientation du casque déterminent la position et l'orientation de la tête de l'avatar, tandis que l'orientation et la position des mains de l'avatar sont déterminées par la position et l'orientation des manettes. Les membres supérieurs sont reconstruits par un script de cinématique inverse.	64
23	A. Représentation schématique de la CAVE utilisée durant cette thèse (salle Immersia, Rennes) ainsi que de ses dimensions et résolutions graphiques. B. Photo réelle de la salle, avec deux utilisateurs.	66
24	Représentation graphique de l'avatar d'un participant, réalisant une T-pose utilisée lors de la calibration.	67

25	Représentation de l'expérience et l'environnement virtuel utilisé pour étudier la coopération entre deux participants dans une tâche d'interception de balle. Les deux sujets présentés ici ont donné leur accord écrit pour l'utilisation des photographies.	72
26	Tâche d'interception - point de vue d'un participant. (A) "Alone Condition" (AL) : le participant réalise la tâche seul. (B) "Stationary Partner Condition" (SP) : le participant réalise la tâche assisté d'une raquette partenaire fixe". (C) "Paddle Partner Condition" (PP) : le participant réalise la tâche assisté d'un partenaire réel, mais ne peut voir que sa raquette. (D) "Avatar Partner Condition" (AP) : le participant réalise la tâche assisté d'un partenaire réel, et peut voir son avatar ainsi que sa raquette.	74
27	Représentation schématique du déroulement de l'expérience. Chaque participant réalisait 25 essais dans la condition AL, et 25 essais dans la condition SP. Chaque équipe (de deux participants) réalisait 25 essais dans la condition PP, et 25 essais dans la condition AP.	76
28	Moyenne des scores d'interception (en % par sujet, relativement à la position d'arrivée de la balle, lorsque les participants était seuls (Condition AL))	79
29	Distance moyenne que les participants auraient dû couvrir lors des essais manqués, et lorsque la balle devait être interceptée par le participant, pour les conditions AL et SP *** : significativement différent de AL ($p < 0,001$)	81
30	Résumé graphique de la performance d'interception de balle comme fonction de la position d'arrivée de la balle (Condition SP). Les points verts représentent les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant, et les points bleus les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le partenaire fixe. Les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles lors des essais manqués sont indiquées par les points jaunes (essais non-interceptés) et les points rouges (collisions). La ligne pointillée verticale noire indique le centre de l'axe X d'interception, et la ligne pointillée verticale rouge indique la limite physique du bord proximal de la raquette partenaire. La courbe noire représente la courbe de régression logistique relative à la probabilité que P_1 ($P = 1$) ou $Stationary_P$ ($P = 0$) intercepte la balle, comme fonction de la position finale de la balle. Les courbes violettes représentent l'intervalle de confiance à 95%.	82

- 31 **Résumé graphique de la performance d'interception de balle comme fonction de la position d'arrivée de la balle (Condition PP).** Les points verts représentent les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 1, et les points bleus les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 2. Les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles lors des essais manqués sont indiquées par les points jaunes (essais non-interceptés) et les points rouges (collisions). La ligne pointillée verticale noire indique le centre de l'axe X d'interception. La courbe noire représente la courbe de régression logistique relative à la probabilité que P_1 ($P = 1$) ou P_2 ($P = 0$) intercepte la balle, comme fonction de la position finale de la balle. Les courbes violettes représentent l'intervalle de confiance à 95%. 83
- 32 **Résumé graphique de la performance d'interception de balle comme fonction de la position d'arrivée de la balle (Condition AP).** Les points verts représentent les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 1, et les points bleus les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 2. Les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles lors des essais manqués sont indiquées par les points jaunes (essais non-interceptés) et les points rouges (collisions). La ligne pointillée verticale noire indique le centre de l'axe X d'interception. La courbe noire représente la courbe de régression logistique relative à la probabilité que P_1 ($P = 1$) ou P_2 ($P = 0$) intercepte la balle, comme fonction de la position finale de la balle. Les courbes violettes représentent l'intervalle de confiance à 95%. 84
- 33 **Représentation schématique du déroulement de l'expérience.** Chaque participant réalisait 25 essais dans la condition HeA, et 25 essais dans la condition HaA. Chaque équipe (de deux participants) réalisait 25 essais dans la condition HeA, et 25 essais dans la condition HaC. 98

- 34 **Résumé graphique de la performance d'interception de balle comme fonction de la position d'arrivée de la balle (Condition HeC).** Les points verts représentent les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 1, et les points bleus les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 2. Les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles lors des essais manqués sont indiquées par les points jaunes (essais non-interceptés) et les points rouges (collisions). La ligne pointillée verticale noire indique le centre de l'axe X d'interception. La courbe noire représente la courbe de régression logistique relative à la probabilité que P_1 ($P = 1$) ou P_2 ($P = 0$) intercepte la balle, comme fonction de la position finale de la balle. Les courbes violettes représentent l'intervalle de confiance à 95%. 103
- 35 **Résumé graphique de la performance d'interception de balle comme fonction de la position d'arrivée de la balle (Condition HaC).** Les points verts représentent les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 1, et les points bleus les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles interceptées par le participant 2. Les positions d'arrivée (sur l'axe X) des balles lors des essais manqués sont indiquées par les points jaunes (essais non-interceptés) et les points rouges (collisions). La ligne pointillée verticale noire indique le centre de l'axe X d'interception. La courbe noire représente la courbe de régression logistique relative à la probabilité que P_1 ($P = 1$) ou P_2 ($P = 0$) intercepte la balle, comme fonction de la position finale de la balle. Les courbes violettes représentent l'intervalle de confiance à 95%. 104

Liste des tableaux

1	Score global d'interception et nombre de collisions durant l'expérience *** : significativement différent de AL ($p < 0,001$)	79
2	Moyenne du temps d'initiation de mouvement des participants pour toutes les conditions, pour l'ensemble des essais, pour les essais interceptés uniquement, et pour les essais manqués uniquement * : significativement différent de AL ($p < 0,05$) † : significativement différent de SP ($p < 0,05$)	85
3	Scores globaux d'interception et de collisions ††† : significativement différent de HeA ($p < 0,001$) *** : significativement différent de HaA ($p < 0,001$) £ : significativement différent de HeC ($p < 0,05$) . . .	102
4	Moyenne du temps d'initiation de mouvement des participants pour toutes les conditions : pour l'ensemble des essais, pour les essais interceptés uniquement, et pour les essais manqués uniquement ††† : significativement différent de HeA ($p < 0,001$) *** : significativement différent de HaA ($p < 0,001$)	105
5	Évolution moyenne de l'angle θ, pour les essais réussis et les essais manqués ††† : significativement différent des essais réussis pour la même condition ($p < 0,001$) * : significativement différent de HaA pour les essais réussi ($p < 0,05$)	106

Titre : Analyse en réalité virtuelle de la coopération lors d'une interception de balle : interaction et interférence

Mots clés : Réalité virtuelle, Coopération interpersonnelle, Interactions collaboratives, Perception-action, Interception de balle, Interférence, Zone d'incertitude

Résumé : Dans nos actions quotidiennes, nous interagissons avec le monde environnant, et bien souvent, nous coordonnons nos actions avec celles des autres pour être plus efficaces. Seulement, dans certaines situations, une interférence apparaît entre les participants, donnant lieu à une coopération inefficace voire délétère. Or, très peu d'études se sont intéressées à ce phénomène, pourtant fréquemment rencontré, par exemple dans les sports collectifs. Ce travail a pour objectif l'analyse de cette interférence, via la construction et l'utilisation de situations collaboratives en réalité virtuelle, lors d'une tâche d'interception de balle. En l'absence de communication verbale, deux individus devaient décider tacitement lequel interceptait la balle, et lequel s'effaçait pour laisser le partenaire réaliser l'interception.

Au travers de deux études complémentaires, nous avons étudié l'impact des conditions de la tâche sur la coopération et l'interférence entre les participants, lors d'interceptions réalisées face-à-face ou côte-à-côte. Nos résultats suggèrent tout d'abord que la coordination d'équipe émerge de l'interaction directe entre les participants durant l'essai. De plus, nous avons observé que si la division de l'espace d'interception est globalement bien définie, il existe cependant une "zone d'incertitude" où de nombreux essais sont manqués, traduisant la difficulté des participants à mettre en place des patterns d'interception efficace dans cette zone. L'interférence qui apparaissait alors entre eux dépend de la complexité de la tâche (incertitude sur l'action du partenaire, information visuelle disponible, mode d'interception).

Title : Analysis in virtual reality of cooperation during ball interception: interaction and interference

Keywords : Virtual reality, Interpersonal cooperation, Collaborative interactions, Perception-action, Ball interception, Interference, Area of uncertainty

Abstract : In our daily life activities, we interact with the surrounding world, and we often coordinate our actions with those of others in order to be more effective. However, in some cases, interference between participants occurs, resulting in inefficient or even deleterious cooperation. However, very few studies have looked at this phenomenon, although it is a common situation, frequently encountered for example in the collective sports. This work aims at analyzing this interference, through the construction and use of collaborative situations in virtual reality, during a ball interception task. In the absence of any verbal communication, two participants had to tacitly decide who would perform the interceptive action, and who would not.

Through the design of two complementary studies, we studied the impact of the conditions on the cooperation and the interference between the participants, during interceptions performed face-to-face or side-by-side. Our results suggest that team coordination emerges from direct interaction between participants during the trial. Moreover, we observed that although the division of the interception space is globally well defined, there is however an "area of uncertainty" where many trials are missed, showing participants' difficulty in identifying efficient patterns of interception in this area. Then, the interference that appeared between them depends on the task complexity (uncertainty on the action of the partner, visual information available, mode of interception).