



Coordinations visuo-motrices durant la locomotion : Une approche croisée entre les Sciences du Mouvement et les Sciences du Numérique pour l'analyse des facteurs situationnels et individuels impliqués dans les interactions entre marcheurs

Anne-Hélène Olivier

► To cite this version:

Anne-Hélène Olivier. Coordinations visuo-motrices durant la locomotion : Une approche croisée entre les Sciences du Mouvement et les Sciences du Numérique pour l'analyse des facteurs situationnels et individuels impliqués dans les interactions entre marcheurs. Biomechanics [physics.med-ph]. Université Rennes 2, 2020. tel-03774288

HAL Id: tel-03774288

<https://inria.hal.science/tel-03774288>

Submitted on 10 Sep 2022

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.

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

L'UNIVERSITE RENNES 2

COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 603

Education, Langages, Interaction, Cognition, Clinique

Spécialité : STAPS

Par

Anne-Hélène OLIVIER

Coordinations visuo-motrices durant la locomotion

Une approche croisée entre les Sciences du Mouvement et les Sciences du Numérique pour l'analyse des facteurs situationnels et individuels impliqués dans les interactions entre marcheurs

HDR présentée et soutenue à Rennes, le 7 décembre 2020

Unité de recherche : Laboratoire Mouvement Sport Santé (M2S)

Rapporteurs avant soutenance :

Christine Assaïante	Directrice de recherche CNRS, Aix-Marseille Université
Bradford McFadyen	Professeur d'Université, Université Laval (Canada)
Catherine Pelachaud	Directrice de recherche CNRS, Université Pierre et Marie CURIE

Composition du Jury :

Rapporteurs :	Christine Assaïante Bradford McFadyen Catherine Pelachaud	Directrice de recherche CNRS, Aix-Marseille Université Professeur d'Université, Université Laval (Canada) Directrice de recherche CNRS, Université Pierre et Marie CURIE
Examineurs :	Christophe Bourdin Katja Mombaur	Professeur d'Université, Aix-Marseille Université Professeure d'Université, Université de Waterloo (Canada)
Garant :	Benoit Bideau	Professeur d'Université, Rennes 2
Invité :	Armel Crétual	Maître de conférences HDR, Université Rennes 2

A la mémoire de mon père, Joël Olivier (1948-2011)

Remerciements

La rédaction de ce mémoire d'HDR est l'occasion pour moi de dresser un bilan de 15 années intenses de recherche sur la question des interactions non verbales du marcheur avec son environnement. Au-delà de ce bilan scientifique, c'est aussi l'occasion de mesurer ma chance d'avoir pu bénéficier d'interactions d'une autre nature sans qui ce travail n'aurait jamais pu avoir la même saveur. La métaphore de la cuisine et du repas me tient à cœur, car elle rend si bien compte des valeurs de transmission, de curiosité et de partage si fondamentales dans ce métier ainsi que de l'importance des idées issues des discussions et collaborations, à l'image des épices qui permettent de donner de nouvelles perspectives à la recette initiale.

Je tiens tout d'abord à remercier Armel. La première rencontre marquante avec ton pull à flèches remonte à 20 ans déjà et devait être indicatrice du rôle de guide que tu as joué dans la construction de mon parcours d'enseignante-chercheuse. Je ne compte plus le nombre d'expérimentations menées ensemble, associés à de sacrés moments de rigolade, lors de capture de mouvement de course en tenue de manip qui débouche sur le cocktail du pôle image et réseau, ton t-shirt d'instructeur, après avoir réchauffé ta gamelle sur le mauvais programme du four micro-ondes ou encore après avoir répété toute la semaine 400 fois par jour "yeux fermés, 90deg, c'est parti!". Ta grande culture mais aussi ta capacité à retenir toutes les choses improbables m'étonneront toujours, allant des chanteurs néerlandais au chef-lieu de canton. Ton honnêteté scientifique et ton humilité sont de très grandes valeurs à mes yeux. C'est un plaisir sincère de pouvoir à ce jour collaborer avec toi à la fois sur des projets d'enseignement et des projets de recherche. La confiance mutuelle qui s'est instaurée est précieuse.

Un aspect de mon métier que j'affectionne particulièrement est l'encadrement de jeunes chercheurs(ses). S'il rime d'une part avec la notion de formation et d'accompagnement, il est surtout l'occasion d'une grande richesse d'échanges mais également de découvertes. J'ai la chance d'interagir avec de jeunes chercheurs(ses) provenant de divers horizons, au profil plutôt STAPS, informatique ou encore clinique. Cela m'emmène parfois vers des terrains inconnus qui rendent cette aventure encore plus intéressante.

Julien B., une force tranquille, bien que rebondissante ! Ton professionnalisme et ta bonne humeur ont été de précieux atouts pour manipuler des semaines durant en Immersia sans voir le jour.

Sean, en tant que bon Gallois, tu as commencé par relever le challenge de passer les auditions de bourses de thèse devant un jury qui parle français, et ce fut un succès. Ta

bienveillance fut appréciée de tous au laboratoire et ce fut l'occasion de nous pousser de notre routine de confort pour parler en anglais avec notre sacré accent français. Tu as su t'approprier ce domaine de recherche sur les interactions entre marcheurs en tirant profit de l'usage de la réalité virtuelle. Cette étude curvilinéaire nous aura donné du fil à retordre mais ce fut l'occasion de nous poser de nombreuses questions. Ces 3 ans furent riches en échanges et je suis ravie de les poursuivre via notre PIE group :)

Rens, j'ai toujours été impressionnée par ta rigueur scientifique et ta capacité à mettre en place de nouvelles analyses pour répondre au mieux à tes questions. Tes compétences, ta grande ouverture d'esprit et ton enthousiasme font de toi un élément moteur essentiel à une équipe. Je me remémore avec un grand éclat de rire la sortie pêche aux huîtres à Cancale. J'attends avec impatience de pouvoir déguster tes recettes de Breton en Cuisine autour d'un bon verre de vin !

Florian, la deadline de ta soutenance approche, une semaine après celle de l'HDR. Il est vrai que tu resteras le premier étudiant "ghost writer", mais surtout je retiens ta volonté de partager et de rendre accessible le fruit de ton travail avec les collègues et ta grande capacité à mettre en place des nouvelles expérimentations dans des conditions complexes. La mesure de l'activité du regard de marcheurs dans la rue Vasselot à Rennes et sa reproduction en virtuel était une tâche ambitieuse et tu as su la mener avec brio.

Hugo, si ton béret et tes yeux qui bougent sont des marqueurs forts, je salue surtout ton ouverture d'esprit pour avoir accepté d'intégrer les lois du mouvement humain dans le développement de nouvelles lois de contrôle de la locomotion en réalité virtuelle. Ton appropriation du sujet et la pertinence des questions que tu te poses sur les problématiques de recherche montre ta grande maturité scientifique, alors il est temps d'arrêter de te poser des questions existentielles :)

Benjamin, ta venue a apporté un sacré élan de cohésion et d'animation de la vie du couloir MimeTIC. Si je souris de tes "plots", je suis très touchée par tes valeurs humaines et je suis ravie de te voir évoluer dans ton sujet de thèse.

Carole, quand tu es venue me solliciter en Master pour un stage sur le rôle des pieds dans le contrôle de la locomotion, je ne me suis pas trop posée de questions. L'idée qu'une podologue cherche à évaluer l'effet de sa pratique non pas en restant immobile durant 51.2s mais en considérant des aspects dynamiques m'a tout de suite interpellée. Les élèves de l'IFPEK ont de la chance d'avoir une prof curieuse et ouverte à la confrontation des communautés. Je retiendrais quand même que le test de l'anesthésie de la voute plantaire à la maison n'était peut-être pas la meilleure idée mais ça nous a valu une sacrée expérience.

Adèle, Emilie, Agathe, Thomas, Raphaël et Pierre, nous n'en sommes encore qu'au début et avons de quoi nous occuper ! Promis, je n'abuserai pas de cette nouvelle casquette pour faire ma chef :)

Alors que leur qualité scientifique n'est pas à démontrer, il est important de souligner la bonne humeur et la bienveillance des collègues avec qui j'ai la chance d'interagir,

qu'ils soient M2S, MimeTIC, Rainbow ou Hybrid. Benoit je te remercie pour la confiance que tu m'as accordée. Je te suis reconnaissante de la place que tu donnes à la thématique interactions piétons dans les projets du M2S. Franck je te remercie pour le soutien sans faille de l'équipe MimeTIC, avec une pensée forte pour Nathalie qui se soucie toujours de notre bien-être. Au-delà de pauses café toujours enjouées, et des blind-tests endiablés voire discrètement glissés dans les mails, c'est un environnement véritablement propice à la collaboration. Ludo, Ferran, Marc, Claudio, Marie, Richard, Maud, Charles, Katja, Mathieu, vous avez chacun votre approche mais je vous suis reconnaissante de la simplicité avec laquelle s'effectuent les encadrements et les projets communs. Pour mener toutes ces expérimentations, il en aura fallu des campagnes de recrutement de participants (et ce n'est pas fini !) : tout le monde répond toujours présent, pour être sujet de l'expérience (avec parfois des tenues improbables), recruter ses enfants ou les copains, venir donner un coup de main au déroulement de l'expérience. Je suis sûre que vous viendriez même sans les kilos de bonbons et de gâteaux qui traînent toujours sur la table dans le gymnase. Merci Lyse, Pierre, Charles, Théo, Alexandre, Annabelle, Guillaume, Françoise, Amélie, Elisabeth, Gaëlle, Carole, Diane, Sébastien... et merci Ronan, Florian, Quentin et Georges pour votre disponibilité pour réaliser les manips en Immersia.

En faisant le bilan de ces 15 années, il est fort agréable de constater de belles rencontres. Sophie et Carole, votre amitié est précieuse et nos discussions autour d'un déjeuner me manquent, il est temps d'y remédier. Hala, la vie n'est pas tendre et j'admire ta force et ta détermination. Claudia, je me délecte de ton humour pince sans rire ; Nico V. tes jeux de mots sont mes préférés ; Seb, mon destin est un peu lié au tien. Nicolas F. je pourrais me vanter d'avoir soutenu mon HDR pieds-nus, en visio, c'est l'avantage :) Delphine, j'ai toujours plaisir à te retrouver au détour d'une conférence. Richard cours moins vite, je n'arrive pas à te suivre ! Anthony, je crois que c'est un signe que nous partageons le $A\pi$ office. Antoine, quoiqu'il arrive, tu as toujours la solution ! Ta présence est précieuse. Steve et Ferran, vous avez toujours répondu présent dans les moments un peu complexes de mon parcours : Ferran et Anna, j'attends avec impatience le retour de nos dîners japonais ; Steve, je suis toujours ravie de me confronter à ton sens critique et tes questions existentielles ! Alain, nos réunions quand j'étais doctorante ont toujours été impressionnantes. Je me réjouis à présent de nos discussions avec Daniel sur ces questions complexes de géométrie et d'espace de locomotion. Avec Armel, nous nous plaisons à nommer ces expériences les "manips de l'espace" mais cela est représentatif de votre curiosité et de vos idées sans limites. Bill, j'ai un profond respect pour votre humilité, votre accessibilité et votre pédagogie très constructive. Jean-Paul et Philippe, j'ai pu découvrir par vos échanges bienveillants le monde de la robotique et certains de ses enjeux non sans originalité : je ne me lasse pas de diffuser aux étudiants cette fameuse vidéo du poulet pour illustrer la stabilisation de la tête. Michael, je crois que Waterloo est devenu ma seconde famille scientifique après Rennes et je te remercie de

ton accueil et de la confiance que tu m'accordes. Tu as donné un véritable élan à ma recherche sur la question de l'étude des populations spécifiques. Nous formons une bonne équipe, de nombreux projets nous attendent.

Une partie et non des moindres de mes journées voire de mes nuits est occupée par mes activités d'enseignement. Merci Geneviève et Sophie pour m'avoir fait confiance sur le Master APA-S, merci les Isabelle(s), Florence et Liliane pour me rendre la vie plus facile !

Je souhaite également remercier les membres de mon jury d'HDR, Christine Assaiante, Bradford McFadyen, Catherine Pelachaud, Christophe Bourdin et Katja Mombaur. Avant de constituer le jury, j'ai réfléchi à une composition idéale, qui refléterait par ailleurs cette approche multi-disciplinaire qui me tient à cœur et qui représente finalement bien mon parcours STAPS. Je suis très reconnaissante que vous ayez tout de suite accepté cette proposition. En particulier, Brad, c'est un honneur pour moi de te compter parmi ce jury. Le premier papier que j'ai lu au début de ma thèse est ton papier sur l'espace personnel. Ce dernier a fortement inspiré nos études et c'était important pour moi d'avoir ton retour sur les travaux menés. Christine Assaiante, Catherine Pelachaud, j'espère que cette d'HDR aura été l'occasion d'initier des discussions pouvant se prolonger sur des réflexions communes.

Bien évidemment, je ne peux conclure ces remerciements sans penser à ma famille. Marie et Mathieu, Malo et Anne-Claire, Stéphanie et Phiphi, Frédo et Martine, vous m'avez toujours soutenue, quoi qu'il arrive. Maman, quoi dire de plus que j'ai une maman aux petits oignons. Non seulement tu m'as appris à cuisiner (et pas que le célèbre Trio Pâté-Couscous-Flan des déménagements) mais surtout tu m'as transmis des valeurs humaines fortes. Tu réponds toujours présente sans te poser de questions tu dis "j'arrive !", toujours prête à garder les enfants quand c'est jour de conférence, quand les cours commencent trop tôt à Saint-Brieuc, quand il faut venir participer à des expérimentations. Tu es un modèle. Frédo, ce n'était pas évident sur le papier qu'un chercheur en biologie marine collaborerait avec sa sœur stapsienne :) la perspective d'analyser les déplacements des étrilles et autres habitants des fonds marins m'enchantent. Papa tu es parti trop vite pour voir ça. J'ai évidemment une pensée forte pour France et Paul et leur bienveillance. Merci de m'avoir permis de rédiger cet été en vous occupant des enfants !

Julien, la vie nous réserve quelques surprises et ça a du bon. Le canal 94 fut une révélation, et je crois que j'ai fini par te convertir à la cuisine au beurre :) J'ai toujours été admirative de la manière dont tu menais tes recherches, c'est très inspirant. Tu as toujours cru en moi et m'a encouragée dans mes projets, m'a poussée à me dépasser. C'est précieux de te savoir à mes côtés. C'est sûr qu'il est parfois difficile d'arrêter les discussions boulot à la maison ... Je tiens à m'excuser de l'idée brillante que j'ai eue de rédiger mon HDR pendant le confinement avec les enfants à la maison et une entorse pour couronner le tout. La charge de travail fut rude. Je m'engage à laisser un peu de côté mon ordinateur le week-end et les vacances, on a quelques nouvelles recettes à préparer, un cours sur les algues à tester et un canal à explorer. Les enfants, c'est sûr, on va pouvoir retrouver un peu de temps pour faire des gâteaux et du bricolage créatif.

Playlist

Ce document a pour but de faire le bilan de mon activité sur ces 15 dernières années. Je ne serai pas exhaustive si je ne faisais pas un clin d’œil à l’environnement sonore qui m’a accompagnée depuis mon doctorat :

- 2005 Clap Your Hands Say Yeah - *Clap Your Hands Say Yeah*
- 2006 Cat Power - *The Greatest*
- 2007 Tazio and Boy - *Note Book*
- 2008 Alain Bashung - *Bleu Pétrole*
- 2009 Anthony and the Johnsons - *The Crying Light*
- 2010 Hindi Zahra - *Handmade*
- 2011 M83 - *Hurry Up, We're Dreaming*
- 2012 Alt-J - *An Awesome Wave*
- 2013 The National - *Trouble Will Find Me*
- 2014 Vancouver Sleep Clinic - *Winter*
- 2015 Cocorosie - *Heartache City*
- 2016 Tindersticks - *No Treasure But Hope*
- 2017 Rodolphe Burger - *Good*
- 2018 Tamino - *Amir*
- 2019 Balthazar - *Fever*
- 2020 Baxter Dury - *The Night Chancers*

Table des Matières

Liste des Figures	xiii
Liste des Tableaux	xvii
1 Introduction	1
2 Recherche	5
2.1 Cadre théorique	6
2.1.1 Préambule	6
2.1.2 Marche en virage	9
2.1.3 Locomotion dans un environnement encombré	20
2.2 Objectifs de ma recherche	32
2.3 Nouveau paradigme d'étude des interactions entre deux marcheurs	34
2.3.1 Participants	34
2.3.2 Paradigme	34
2.3.3 Hypothèses	36
2.3.4 Analyse	36
2.3.5 Résultats et Discussion	41
2.3.6 Conclusion	48
2.4 La réalité virtuelle pour l'étude des interactions entre marcheurs	50
2.4.1 Contexte	50
2.4.2 Les prémisses de nos études d'évitement de collision avec un humain virtuel	53
2.4.3 Effet des interfaces de locomotion sur la tâche d'évitement de collision entre deux marcheurs dans une salle immersive	59
2.4.4 Activité du regard et influence du retour haptique des collisions en réalité virtuelle.	73
2.4.5 Conclusion	90
2.5 Facteurs d'influence	95
2.5.1 Facteurs situationnels	96
2.5.2 Facteurs individuels	121
2.5.3 Conclusion	148

3 Projets de recherche	151
3.1 Présentation générale	151
3.2 Axe 1 : Des variables observationnelles aux variables de contrôle. . . .	155
3.2.1 Risque de collision : distance vs. temps	155
3.2.2 Risque de collision et risque physique : interaction entre un marcheur et un véhicule	158
3.2.3 Approche multimodale des contacts physiques	166
3.3 Axe 2 : Réalité virtuelle et interactions entre marcheurs.	169
3.3.1 Évaluation des dispositifs immersifs	169
3.3.2 Vers des humains virtuels réactifs et expressifs	173
3.4 Axe 3 : Approche individuelle des coordinations visuo-motrices	178
3.4.1 Patients douloureux chroniques et prise en charge ostéopathique	179
3.4.2 Symptômes persistants de la commotion cérébrale	182
3.5 Conclusion	185
Bibliographie	187

Liste des Figures

1.1	Trois grands thèmes de recherche.	3
2.1	Loi de puissance entre le rayon de courbure et la vitesse tangentielle lors de trajectoires locomotrices périodiques.	10
2.2	Stéréotypie des trajectoires locomotrices.	11
2.3	Comportement anticipateur de la tête.	14
2.4	Stratégies de pose de pieds pour tourner.	16
2.5	Contributions sur le thème de la locomotion en virage.	18
2.6	Détermination du risque de collision grâce à la dérivée de l'angle de gisement.	21
2.7	Distances sociales et interactions entre personnes.	22
2.8	Quantification de l'espace personnel durant la locomotion.	23
2.9	Trois types de collisions avec un obstacle mobile.	27
2.10	Obstacle mobile arrivant sur un chemin de collision frontale.	30
2.11	Paradigme expérimental de croisement à 90° entre deux marcheurs.	35
2.12	Hypothèse d'une asymétrie des adaptations en lien avec la forme de l'espace personnel.	37
2.13	Illustration de $mpd(t)$ lors d'un croisement entre deux marcheurs.	39
2.14	Évolution de la mpd durant la phase d'interaction pour tous les essais.	42
2.15	Évolution moyenne de $mpd(t)$ selon le risque initial de collision future.	43
2.16	Évolution moyenne de $mpd(t)$ pour une distance future de croisement inférieure à 1m.	44
2.17	Calcul de la phase de réaction normalisée.	45
2.18	Contributions (%) de chaque marcheur à l'évitement de collision.	46
2.19	Contribution des stratégies d'adaptation de la vitesse et de l'orientation pour éviter la collision.	47
2.20	Boucle d'interaction en conditions réelles et virtuelles.	51
2.21	Étude en perception de la situation d'interaction entre deux marcheurs.	55
2.22	Evitement de collision avec un obstacle statique dans une salle immersive	56
2.23	Prise en compte de l'espace personnel de l'obstacle humain dans l'évitement de collision.	57

2.24	Conditions expérimentales pour évaluer la fidélité des interactions entre marcheurs dans une salle immersive.	61
2.25	Exactitude des réponses des participants concernant le risque futur de collision et l'ordre de passage au croisement en salle immersive.	63
2.26	Trajectoires relatives au déplacement du marcheur virtuel en fonction des 6 interfaces de locomotion testées	65
2.27	Nombre moyen de collision avec le marcheur virtuel.	68
2.28	Évolution moyenne de <i>mpd</i> durant la phase d'interaction selon l'interface de locomotion.	69
2.29	Évolution moyenne de la dérivée temporelle de <i>mpd</i> durant l'interaction selon les interfaces de locomotion.	71
2.30	Retours subjectifs des participant sur chaque interface de locomotion.	72
2.31	Conditions expérimentales pour l'étude de l'activité du regard lors du croisement entre deux marcheurs en réalité virtuelle.	76
2.32	Répartition des fixations lors de l'interaction entre deux marcheurs en conditions réelles et virtuelles.	77
2.33	Évolution de différents angles liés au regard lors de la phase d'interaction entre deux marcheurs.	78
2.34	Procédure expérimentale pour évaluer l'effet de la réalité virtuelle sur l'activité du regard d'un marcheur dans une rue où se déplacent d'autres marcheurs.	80
2.35	Comparaison des données oculaires durant la navigation dans une rue réelle et virtuelle.	82
2.36	Illustration de l'expérience sur l'effet du retour haptique des collisions lors de la navigation dans une foule.	85
2.37	Trajectoires de marche obtenues pour un essai en fonction de la condition de retour haptique.	87
2.38	Effet du retour haptique des collisions sur la rotation des épaules, la vitesse de marche et le nombre de collisions.	87
2.39	Cas applicatifs de l'utilisation de protocoles en réalité virtuelle.	92
2.40	Etudes supplémentaires sur l'effet des facteurs situationnels et individuels lors d'interactions non-verbales entre individus.	95
2.41	Etude du risque de collision dans une foule virtuelle et classification du risque de collision des marcheurs selon la méthode des fronts de Pareto.	99
2.42	Fréquences relative de fixation, durée de fixation et pourcentage de marcheurs fixé et évité dans une situation de navigation dans une foule virtuelle.	101
2.43	Fréquence de distribution normalisée des fixations avant une manœuvre d'évitement.	102

2.44	Dispositif expérimental pour l'étude des interactions entre un marcheur et un robot mobile.	107
2.45	Evolution de <i>smpd</i> durant la phase d'interaction entre un marcheur et un robot passif et réactif.	109
2.46	Extrapolation linéaire de <i>mpd</i> pour une trajectoire curvilinéaire.	115
2.47	Dispositif expérimental pour l'étude des interactions avec un marcheur virtuel se déplaçant sur une trajectoire curviligne.	116
2.48	Evolution de <i>mpd</i> en fonction de la trajectoire de l'humain virtuel.	118
2.49	Dispositif expérimental pour l'étude des facteurs individuels de l'interaction entre deux marcheurs.	122
2.50	Évolution de <i>mpd</i> et sa dérivée durant la phase d'interaction lors d'un croisement impliquant des jeunes adultes et des enfants.	129
2.51	Contribution cumulée de chaque marcheur dans les variations de <i>mpd</i> durant la phase d'interaction lors d'un croisement impliquant des jeunes adultes et des enfants.	130
2.52	Évolution de <i>mpd</i> durant la phase d'interaction lors d'un croisement impliquant des jeunes adultes et des personnes âgées.	135
2.53	Contribution cumulée de chaque marcheur dans les variations de <i>mpd(t)</i> durant la phase d'interaction lors d'un croisement impliquant des jeunes adultes et des personnes âgées.	136
2.54	Évolution de <i>mpd</i> durant la phase d'interaction lors d'un croisement impliquant des athlètes sains et des athlètes commotionnés.	145
2.55	Contribution cumulée de chaque marcheur dans les variations de <i>mpd</i> durant la phase d'interaction lors d'un croisement impliquant des athlètes sains et des athlètes commotionnés.	146
2.56	Distanciations sociales et interactions entre marcheurs.	148
3.1	Projet de recherche en trois axes.	152
3.2	Analyse du couplage <i>mpd</i> -TTCA durant la tâche d'évitement de collision.	157
3.3	Protocole de croisement entre un piéton et une personne conduisant un fauteuil roulant électrique.	160
3.4	Illustration du simulateur piéton et de la situation de traversée de rue face à un véhicule traditionnel ou un véhicule autonome.	165
3.5	Architecture et objectifs du projet CrowdDNA.	166

Liste des Tableaux

2.1	Répartition des essais pour l'étude de croisement avec un robot passif et réactif selon l'ordre de passage initial et final des marcheurs.	109
2.2	Pourcentage de collision et d'inversion de l'ordre de passage selon la trajectoire de l'humain virtuel.	117
2.3	Seuil de $mpd(t_{see})$ déclenchant une adaptation, pourcentage d'inversion de l'ordre de passage et distance de croisement lors des croisements impliquant des enfants et des jeunes adultes.	127
2.4	Seuil de $mpd(t_{see})$ déclenchant une adaptation, pourcentage d'inversion de l'ordre de passage et distance de croisement lors des croisements impliquant des personnes âgées et des jeunes adultes.	134
2.5	Procédure de retour au sport après une commotion cérébrale.	140
2.6	Seuil de $mpd(t_{see})$ déclenchant une adaptation, pourcentage d'inversion de l'ordre de passage et distance de croisement lors des croisements impliquant des athlètes commotionnés et sains.	144

No amount of experimentation can ever prove me right; a single experiment can prove me wrong.

— Albert Einstein

1

Introduction

Après avoir été bercée dans l'univers du sport par un père qui suivait à la télévision l'ensemble des disciplines sportives (passant de la Formule 1, à la boxe ou encore à ces concours incroyables de javelot avec Jan Zelezný), après avoir passé des heures dans les vagues de la plage du Minihic avec mes frères ou sur la piste d'athlétisme de Marville au CJF de Saint-Malo, c'est tout naturellement que je me suis inscrite en 2000 au STAPS de Rennes avec pour idée en tête d'être enseignante d'EPS. De cette idée fixe m'animant depuis déjà quelques années, ma vision du monde des STAPS s'est ouverte à un champ des possibles beaucoup plus large grâce aux enseignements que j'ai pu suivre lors de ma formation universitaire. Non sans cacher que mon stage en milieu scolaire à l'école primaire (école où sont actuellement scolarisés mes enfants !) ait participé à mes changements de projets, je me suis prise de passion pour le monde de la recherche sur le mouvement humain. Le stage de Master 2, au sein du laboratoire Mouvement Sport Santé (M2S) de l'Université Rennes 2 (qui s'appelait il y a quelques années le Laboratoire de Physiologie et de Biomécanique de l'Exercice Musculaire) m'a permis de mettre un vrai pied à l'étrier sur les problématiques liées à la génération de la trajectoire locomotrice dans un environnement (en particulier en se focalisant sur la question de la relation entre la vitesse et la courbure d'une trajectoire en virage) mais également aux approches expérimentales. Notamment, en réinterprétant dans le domaine des Sciences du Mouvement les paroles du théologien Bernard de Clairvaux *"Les mouvements de*

l'Homme extérieur vous révèlent les changements survenus dans l'Homme intérieur", j'ai pu être sensibilisée à cette approche fascinante, et qui continue d'orienter ma démarche scientifique, selon laquelle l'analyse du mouvement produit permet de comprendre des éléments du contrôle de ce dernier.

J'ai poursuivi ces travaux sur la locomotion en interaction avec son environnement entre 2005 et 2008 au sein du laboratoire M2S grâce à un doctorat, guidée par les conseils avisés d'Armel Crétual et d'Alain Berthoz, pendant lequel j'ai pu également initier la question des interactions non verbales entre deux marcheurs. La mise en place d'un paradigme expérimental pour l'étude des interactions entre marcheurs était ambitieuse et son analyse nouvelle mais ce fut l'occasion d'initier de nouvelles problématiques qui sont devenues le cœur de mon activité de recherche. A la suite de mon doctorat, j'ai eu la chance de participer à différents projets de recherche autour des interactions entre marcheurs qui m'ont conduite à rejoindre l'Inria Rennes et ses équipes aux noms successifs de Bunraku puis MimeTIC. Prenant le parti d'une mobilité thématique, avec la confiance de Julien Pettré qui avait déjà bien compris l'intérêt précieux de la transdisciplinarité, ce fut l'occasion de transposer mon activité du domaine des Sciences du Mouvement au domaine des Sciences du Numérique. J'ai pu alors appréhender une autre approche expérimentale qui impliquait non plus des situations de laboratoire en réel mais des situations utilisant les outils du numérique et en particulier la réalité virtuelle. Il était alors possible d'immerger un participant dans un monde virtuel en interaction avec un autre humain, mais virtuel. L'objectif principal était d'augmenter notre connaissance sur la locomotion en interaction avec son environnement, afin de développer de nouveaux modèles de déplacement du marcheur, permettant de générer des nouvelles simulations de déplacement d'humains virtuels plus réalistes. Il s'agissait alors d'explorer les possibilités offertes par ces outils pour l'analyse des interactions et notamment de valider cette technologie avant de pouvoir l'utiliser pour développer de nouvelles expérimentations. La technologie évoluant si rapidement, nous sommes passés de pré-expérimentations avec une énorme tour reliée à un casque de réalité virtuelle extrêmement lourd que nous poussions avec un chariot derrière la personne qui marche à des systèmes légers et très peu câblés qui permettent de se déplacer avec un sac à dos et un casque de réalité virtuelle dans un grand espace.

Mon retour en 2014 au laboratoire M2S en tant que Maître de Conférences, avec un statut de membre associé de l'équipe MimeTIC de l'Inria, m'a permis de potentialiser les deux grands domaines de recherche que sont les Sciences du Mouvement et les Sciences du Numérique et de faire évoluer ce grand thème complexe qu'est la compréhension des interactions entre piétons, en évaluant l'influence des facteurs situationnels et individuels sur les stratégies d'évitement de collision. Grâce à la mise en place d'une collaboration forte avec l'Université Wilfrid Laurier (Canada) et en particulier Michael Cinelli, j'ai pu initier l'étude de populations spécifiques (enfants, personnes âgées, athlètes ayant subi une commotion cérébrale) dans des situations d'interaction qui avaient été peu explorées jusqu'alors. L'intégration de la réalité virtuelle à mon approche expérimentale a permis de donner une nouvelle dimension à l'analyse des coordinations visuo-motrices puisqu'il est alors possible de manipuler les informations visuelles disponibles et les caractéristiques des situations de manière standardisée, nous permettant d'analyser par exemple l'effet de la nature de la trajectoire du piéton avec lequel on interagit (linéaire ou courbe), ou encore l'effet du contact visuel par le regard.

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches est ainsi l'occasion de dresser un bilan de mes travaux sur ces 15 dernières années, réalisés autour de trois grands thèmes, illustrés sur la Figure 1.1 : la génération d'une trajectoire locomotrice dans un environnement, les interactions entre personnes et la validation et l'usage de la réalité virtuelle pour créer de nouvelles situations d'analyse de ces interactions.

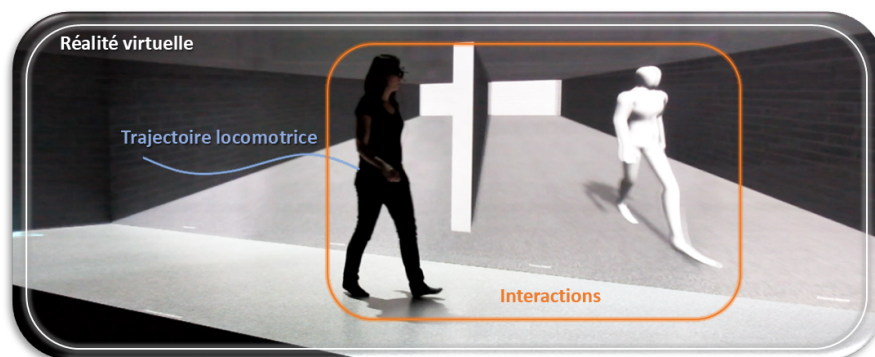


FIGURE 1.1 – En s'appuyant sur une approche expérimentale multi-disciplinaire, trois grands thèmes ont structuré ma recherche : la génération d'une trajectoire locomotrice dans un environnement, les interactions entre personnes et la validation et l'usage de la réalité virtuelle pour créer de nouvelles situations d'analyse de ces interactions.

Ces grands thèmes de recherche ont été traités par une approche expérimentale multidisciplinaire, alliant les Sciences du Mouvement et les Sciences du Numérique, qui a débuté pendant ma thèse et a pris des directions modelées par les environnements dans lesquels j'ai eu la chance d'évoluer et les collaborations que j'ai pu menées. Dans ce mémoire, pour des questions de lisibilité, mais aussi pour refléter mes contributions principales dans le domaine, j'ai choisi de ne présenter que les travaux relatifs aux interactions entre marcheurs. Mes travaux liés au changement de direction durant la locomotion seront référencés dans mon CV par le biais des publications, projets et étudiants encadrés sur ces thématiques et décrit brièvement à la fin de la section 2.1.2.

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches s'organisera alors de la manière suivante. Je présenterai dans un premier temps les résultats principaux de ma recherche sur les interactions entre marcheurs en prenant soin de les contextualiser avec la littérature du domaine. Puis, je dresserai les perspectives de ces travaux afin de présenter les orientations futures de mes recherches. Dans un dernier temps, je présenterai mon CV étendu qui détaillera mon parcours, mes activités et mes responsabilités à la fois dans le domaine de la recherche mais également celui de l'enseignement, qui occupe une part importante de mon activité de Maître de Conférences.

Rien ne peut jamais marcher si l'on songe à tout ce qu'il faut pour que ça marche.

— Daniel Pennac, "Monsieur Malaussène"

2

Recherche

Table des Matières

2.1	Cadre théorique	6
2.1.1	Préambule	6
2.1.2	Marche en virage	9
2.1.3	Locomotion dans un environnement encombré	20
2.2	Objectifs de ma recherche	32
2.3	Nouveau paradigme d'étude des interactions entre deux marcheurs	34
2.3.1	Participants	34
2.3.2	Paradigme	34
2.3.3	Hypothèses	36
2.3.4	Analyse	36
2.3.5	Résultats et Discussion	41
2.3.6	Conclusion	48
2.4	La réalité virtuelle pour l'étude des interactions entre marcheurs	50
2.4.1	Contexte	50
2.4.2	Les prémisses de nos études d'évitement de collision avec un humain virtuel	53
2.4.3	Effet des interfaces de locomotion sur la tâche d'évitement de collision entre deux marcheurs dans une salle immersive	59
2.4.4	Activité du regard et influence du retour haptique des collisions en réalité virtuelle.	73
2.4.5	Conclusion	90
2.5	Facteurs d'influence	95
2.5.1	Facteurs situationnels	96
2.5.2	Facteurs individuels	121
2.5.3	Conclusion	148

2.1 Cadre théorique

Afin de poser les éléments de contexte dans lequel ont été initiés mes travaux de recherche sur la question des interactions entre marcheurs, je vais dans un premier temps proposer une analyse de la littérature jusqu'en 2008, année à partir de laquelle nous avons initié la formulation de nos problématiques. Je commencerai par un préambule sur la question de l'analyse de la locomotion. Ensuite, je présenterai les études portant sur les interactions entre le marcheur et son environnement avec en premier lieu celles qui ont porté sur l'analyse du changement de direction durant la marche (qui me permettra d'introduire quelques-unes de mes contributions scientifiques sur cette thématique), puis celles relatives à la navigation dans un environnement encombré, en se focalisant sur le cas de l'évitement de collision par contournement des obstacles.

2.1.1 Préambule

De l'Antiquité jusqu'à nos jours, de nombreux scientifiques se sont intéressés à décrire et comprendre le mouvement, et en particulier la locomotion humaine et animale. Ainsi, dès 350 av. J.C., dans différents traités ("*De la marche des animaux*", "*Du mouvement des animaux*"), Aristote s'est attaché à décrire la façon dont la locomotion était initiée, à mettre en évidence les différents modes de locomotion liés par exemple au nombre d'appuis au sol (locomotion bipède, quadrupède...); Giovanni Borelli ("*De motu Animalium*", 1680) s'est intéressé aux aspects musculaires du mouvement; à la fin du 19^{me} siècle, après avoir découvert les travaux de Eadweard Muybridge sur la décomposition photographique, Etienne-Jules Marey et Georges Demenÿ ont permis d'élargir le champ des possibles pour la compréhension du mouvement, notamment grâce à l'utilisation de techniques chronophotographiques permettant de capturer le mouvement. Ces dernières décennies ont été marquées par des progrès technologiques fulgurants qui ont permis d'aborder les problématiques liées à la locomotion humaine sous des angles de plus en plus variés avec des analyses de plus en plus fines. Si on considère la question de la marche qui nous intéresse particulièrement dans ce projet,

une multitude de travaux a été réalisée dans sa tâche la plus élémentaire en condition de ligne droite, allant de la description des paramètres spatio-temporels du cycle de marche chez des sujets asymptomatiques (GAGE, 1990) ou pathologiques (VON SCHROEDER et al., 1995), à l'étude des aspects énergétiques (CAVAGNA, THYS et ZAMBONI, 1976), ou encore de l'analyse des coordinations segmentaires avec par exemple la mise en avant de plans de covariation dans l'espace des angles d'élévation segmentaire (angle formé entre le segment et la verticale) de la cuisse, de la jambe et du pied (BORGHESE, BIANCHI et LACQUANITI, 1996).

Bien que fondamentales et nécessaires à la compréhension de la marche, ces études en ligne droite ne rendent pas compte de toute la complexité de cette tâche motrice. En effet, comme le soulignent Shumway-Cook et Woolacott, afin d'évaluer les capacités fonctionnelles d'un individu, il est nécessaire de tenir compte du fait qu'un mouvement émerge de l'interaction entre un individu (ayant ses caractéristiques propres en termes de perception, d'action et de cognition), la tâche qu'il doit réaliser mais également l'environnement qui l'entoure (SHUMWAY-COOK et WOOLLACOTT, 2007). L'importance de l'environnement qui entoure l'individu est d'ailleurs au cœur de la théorie écologique de la perception et de l'action. James Gibson, le père fondateur de cette théorie, souligne que le monde animal et son environnement forment une paire inséparable et complémentaire (GIBSON, 1986). La perception de l'environnement ne nécessiterait pas de traitement de l'information, car celle-ci serait accessible directement par le système de perception. L'environnement va ainsi avoir des conséquences directes sur le comportement de l'individu et les comportements moteurs adaptés seraient le résultat de simplifications qui reposent sur des lois de contrôle. Ces dernières mettent en relation directe des variables informationnelles prises dans l'environnement et des variables motrices propres à l'individu. On parle alors de couplage continu entre le système perceptif et le système moteur. Le système visuel serait à l'origine d'une part très importantes des informations directement utilisables dans le contrôle du mouvement. Dans ce cadre, deux notions principales vont intervenir dans la perception visuelle continue de l'environnement par l'individu : les affordances et le flux optique. Le terme d'affordances provient du verbe

anglais "to afford" qui signifie pouvoir se permettre, avoir les moyens. Elles représentent de ce fait des informations perçues en terme de possibilité d'actions (GIBSON, 1986). Elles ne correspondent pas spécifiquement à une grandeur réelle mais plutôt à un rapport acteur-environnement (WARREN, 1984). L'intérêt particulier des affordances réside dans le fait que le sens de l'environnement est établi par rapport à l'acteur lui permettant alors de se situer dans cet environnement. Le flux optique est quant à lui associé aux transformations de l'image rétinienne liées au mouvement. James Gibson précise à ce titre : *"We perceive in order to move but we must also move in order to perceive"* (GIBSON, 1986). Le mouvement est fondamental pour la perception du monde qui nous entoure. Le champ de mouvement attribue un vecteur vitesse à chaque position spatiale d'une séquence d'image, où chaque point du monde réel observé est identifié par sa projection dans le référentiel visuel. Le flux optique correspond au champ vectoriel formé par le mouvement apparent de chaque point composant la séquence d'image et cherche à représenter ce champ de mouvement (HORN, 1986). Chaque vecteur décrit le mouvement de caractéristiques individuelles de l'image. GIBSON (1950) fut le premier auteur à soulever l'importance de la notion de flux optique pour déterminer la direction du déplacement et pour la navigation visuelle. Le rôle important des informations visuelles dans le guidage de la locomotion a été par la suite largement étudié dans la littérature (PATLA, TOMESCU et ISHAC, 2004 ; WARREN, 1998).

Le marcheur doit donc s'adapter à son environnement pour proposer une trajectoire de marche appropriée. Dans ce cadre, les études ont étendu le cas de la marche en ligne droite en considérant des tâches locomotrices incluant des virages et nécessitant ainsi des réorientations de la trajectoire et des segments corporels. Différents aspects ont alors été considérés, que ce soit au niveau des caractéristiques de la trajectoire suivie que des stratégies segmentaires de la tête jusqu'aux pieds. Nous allons les détailler dans la section suivante.

2.1.2 Marche en virage

Relation entre la cinématique et la géométrie de la trajectoire

Nous pouvons tout d'abord faire référence aux études cherchant à faire le lien entre la géométrie de la trajectoire suivie et la cinématique du mouvement global. Ce lien peut être décrit comme un invariant moteur qui régit les mouvements en courbe appelé loi de puissance. Elle a tout d'abord été démontrée sur des mouvements d'écriture et de dessin par Viviani et Terzuolo (1982) et Lacquaniti et al. (1983) ou encore de poursuite oculaire (DE'SPERATI et VIVIANI, 1997). Cette loi stipule que lors d'un mouvement continu régulier, la vitesse instantanée varie avec le rayon de courbure local selon une loi de puissance. Dans un régime établi d'un mouvement cyclique, la vitesse de parcours est proportionnelle à la racine cubique du rayon de courbure. Cette relation de puissance un tiers entre la vitesse horizontale et le rayon de courbure, ou relation linéaire entre le logarithme de la vitesse horizontale et le logarithme du rayon de courbure, s'exprime selon les équations suivantes :

$$V(t) = K.R(t)^{\frac{1}{3}} \quad \text{ou} \quad \log V(t) = \frac{1}{3} \log(R(t)) + \log(K) \quad (2.1)$$

avec : $V(t)$ la vitesse horizontale à l'instant t , $R(t)$ le rayon de courbure local de la trajectoire, et K le coefficient de gain de vitesse.

A partir des années 2000, les auteurs se sont intéressés au transfert de la loi de puissance des mouvements de bras à la locomotion humaine qui met en jeu un ensemble complexe de synergies corporelles. Ainsi, la loi de puissance un tiers a été mise en évidence sur la locomotion humaine en étudiant le centre de rotation de la tête dans le plan horizontal lors d'un mouvement périodique elliptique (VIEILLEDENT et al., 2001). On observe ainsi sur la figure 2.1a que le rayon de courbure et la vitesse tangentielle suivent des évolutions similaires : un minimum de rayon de courbure est toujours atteint en même temps qu'un minimum de vitesse quelle que soit la forme de la trajectoire suivie. Cette loi a également été démontrée pour le mouvement du pied lors d'une marche sur tapis roulant durant la phase de balancé (IVANENKO et al., 2002) ou concernant l'évolution du milieu des épaules, lors de la répétition d'une trajectoire complexe en forme de trèfle

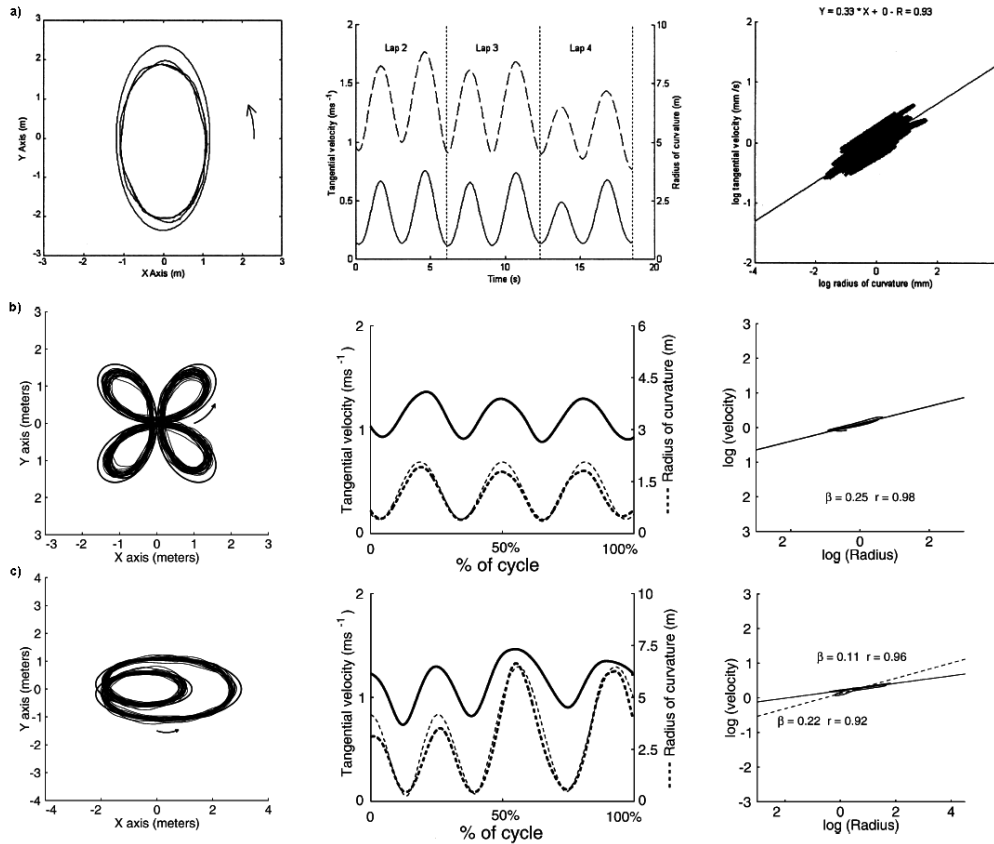


FIGURE 2.1 – Loi de puissance entre le rayon de courbure et la vitesse tangentielle lors de trajectoires locomotrices périodiques : a) loi de puissance un tiers lors de la répétition d’une trajectoire elliptique à vitesse rapide (VIEILLEDENT et al., 2001), b) et c) cette loi de puissance s’exprime différemment pour des trajectoires périodiques en forme de feuille de trèfle ou de limaçon avec une valeur de puissance qui dépend de la forme de la trajectoire suivie (HICHEUR et al., 2005). La loi de puissance un tiers serait donc la particularité des trajectoires elliptiques.

ou de limaçon (HICHEUR et al., 2005). L’expression et la compréhension de cette loi passe par la prise en compte des paramètres intrinsèques de la relation, à savoir la valeur de la puissance notée β et le coefficient de gain de vitesse K . Il a dans un premier temps été démontré que la puissance de la relation avait une valeur de $\frac{1}{3}$. Cette valeur s’applique sur les mouvements de mains (LACQUANITI, TERZUOLO et VIVIANI, 1983 ; VIVIANI et TERZUOLO, 1982) ainsi que sur des trajectoires elliptiques de marche (VIEILLEDENT et al., 2001). Hicheur et al. (HICHEUR et al., 2005) ont démontré qu’en réalité, la loi de puissance s’exprime sous une forme plus générale que la loi de puissance un tiers avec une valeur de puissance qui varie selon la géométrie de la forme au sol suivie par le sujet (2.1 b et c). L’exposant un tiers pour la locomotion serait alors spécifique aux trajectoires

elliptiques. Le coefficient de gain de vitesse correspond quant à lui à une adaptation de la vitesse moyenne. Celui-ci reste constant lors de segments de trajectoire, vus comme des unités d'action, pour des mouvements complexes (VIVIANI et CENZATO, 1985 ; VIVIANI et TERZUOLO, 1982) ou le long de trajectoires elliptiques (LACQUANITI, TERZUOLO et VIVIANI, 1984). Sa valeur dépend du rythme général d'exécution du mouvement mais aussi de la longueur de la trajectoire à réaliser (VIVIANI et CENZATO, 1985).

Stéréotypie des trajectoires locomotrices dirigées vers un but

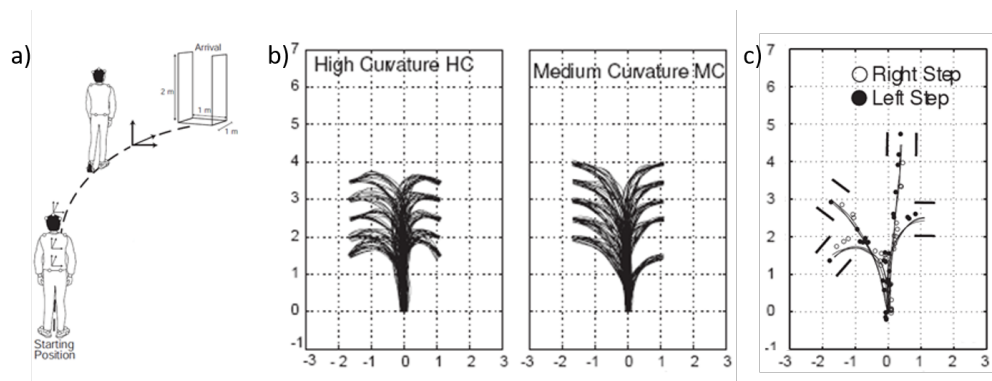


FIGURE 2.2 – Utilisant un paradigme de marche dirigée vers un but (a), Hicheur et al.(2007) ont mis en évidence une stéréotypie de la trajectoire du centre de masse (b), quelle que soit la courbure de la trajectoire, qui ne se retrouve pas au niveau des endroits de pose de pieds (c).

Une autre série d'études, regroupant des chercheurs issus de groupes de Neurosciences et de Robotique, s'est attachée à comprendre les caractéristiques d'une trajectoire locomotrice dirigée vers un but (HICHEUR et al., 2007), mais aussi la façon avec laquelle on pouvait la modéliser (ARECHA VALETA et al., 2006a,b ; PHAM et al., 2007). Le protocole commun à ces études était le suivant : à partir d'une position et orientation initiales, les participants devaient marcher afin de passer une porte dont la position et l'orientation étaient manipulées au fil des essais. La trajectoire à suivre n'était pas imposée (figure 2.2a).

Un premier résultat a mis en évidence le fait que les trajectoires du centre de masse sont très reproductibles, quelle que soit la courbure de la trajectoire. Cette stéréotypie s'exprimait tant au niveau de la géométrie de la trajectoire produite (figure 2.2b) qu'au niveau du profil de vitesse de marche (HICHEUR et al., 2007). Les auteurs ont alors observé une réduction progressive de la vitesse avant de réaliser le virage, durant lequel

cette dernière est lente et constante. Cette diminution de la vitesse de marche en virage peut être mise en lien avec la nécessité de conserver la stabilité dynamique locomotrice (ENGLAND et GRANATA, 2007), ce qui permet de réduire le risque de chute (COURTINE et SCHIEPPATI, 2003) mais aussi d'éviter un obstacle inattendu (ORENDURFF et al., 2006). Pham et al. (2007) ont alors suggéré, en comparant différents modèles aux données réelles, qu'il y aurait ainsi un contrôle cinématique lors de la locomotion dirigée vers un but, de telle sorte que les trajectoires formées soient lisses et minimisent le jerk et le snap (maximum-smoothness theories). Cette stéréotypie caractéristique de la trajectoire du centre de masse n'est pas retrouvée lorsque les auteurs s'intéressent aux événements discrets que sont les poses de pieds (HICHEUR et al., 2007) (figure 2.2c). Ainsi, la trajectoire locomotrice dirigée vers un but, dans un environnement très peu contraint, serait planifiée dans sa globalité et non "pas à pas". Le marcheur adapterait donc le mouvement de ses différents segments afin de respecter cette trajectoire globalement planifiée. Les auteurs concluent alors que le contrôle de la trajectoire s'effectue en terme de déplacement du corps dans l'espace et non pas en terme de déplacement du corps par rapport aux pieds. La variabilité des placements de pieds serait alors le fait de stratégies motrices différentes permettant la réalisation de la tâche locomotrice globalement planifiée. De ce fait, il est suggéré que le déplacement du corps dans l'espace doit être exprimé par le mouvement de la tête ou du tronc dans ce même espace. Dans ce cadre, il a alors été proposé d'aborder la locomotion, sous l'égide de théories de robotique mobile, comme un système différentiel tenant compte de la position et l'orientation du marcheur dans l'espace (ARECHAVALETA et al., 2006b). La locomotion pourrait être alors modélisée comme une tâche non-holonome, c'est-à-dire que des contraintes particulières sont appliquées à la trajectoire de marche. Si l'ensemble des positions de l'espace effecteur (que l'on considère ici les pieds, le centre de masse ou la tête) est atteignable, tous les chemins liant deux de ces positions ne sont pas forcément réalisables. Les auteurs démontrent alors que le tronc se comporte comme un volant ("steering wheel") qui dirige le corps humain dans le cadre de cette modélisation. La trajectoire de marche suit alors l'axe défini comme orthogonal à la ligne des épaules.

Nous venons d'aborder les principaux travaux ayant considéré les caractéristiques du mouvement global de marche en courbe, mouvement du corps modélisé par un point, dont la vitesse est liée à la géométrie de la trajectoire locomotrice et caractérisée par une forte stéréotypie. Nous allons à présent nous intéresser aux études qui ont considéré les stratégies segmentaires. En effet, la réalisation d'un changement de direction lors de la marche est une tâche locomotrice complexe qui implique une coordination fine des mouvements afin de réorienter le corps tout en préservant la stabilité dynamique du système notamment sur l'axe médiolatéral. Durant le virage, les forces centripètes appliquées au centre de masse font que ce dernier se déplace continuellement hors de la base de support (ORENDURFF et al., 2006). Tourner est donc une tâche plus difficile que marcher en ligne droite et ceci tant pour des sujets atteints d'une pathologie (CRENNA et al., 2007; DITE et TEMPLE, 2002; THIGPEN et al., 2000; TINETTI, WILLIAMS et MAYEWSKI, 1986) que pour des sujets sains (COURTINE et SCHIEPPATI, 2003; ORENDURFF et al., 2006; SEGAL et al., 2008).

Anticipation du changement de direction par la tête et le regard

Lorsqu'un sujet marche en courbe, la tête anticipe le changement de direction du corps entier sur le plan horizontal. Ce comportement anticipateur a été observé pour des trajectoires circulaires (GRASSO et al., 1996) ou triangulaires (GLASAUER et al., 2002), pour des trajectoires à angle droit (GRASSO et al., 1998a,b; PRÉVOST et al., 2003) ou en forme de huit (HICHEUR, VIEILLEDENT et BERTHOZ, 2005), pour des trajectoires à 30°, 40° ou 60° (HOLLANDS, SORENSEN et PATLA, 2001; VALLIS et PATLA, 2004; VALLIS, PATLA et ADKIN, 2001), pour des trajectoires où le rayon de courbure est complètement contraint ou libre (SREENIVASA et al., 2008) ou encore pour des trajectoires contraintes uniquement par une position et une orientation initiales et finales (HICHEUR et al., 2007). Quelles que soient les conditions expérimentales, à savoir marcher en avant ou en arrière, avec ou sans la vision, à des vitesses de marche différentes, la tête dévie systématiquement vers la direction à venir (cf. figure 2.3). Ce comportement s'acquiert progressivement durant l'enfance (GRASSO et al., 1998a) : on peut observer chez des enfants, dont l'âge est compris entre 3, 5 et 8 ans, une orientation prédictive de la tête. La différence qui s'opère

avec des adultes concerne uniquement le pic de rotation de la tête qui intervient plus tardivement que chez l'adulte. Le profil de déviation de la tête est alors symétrique selon que le marcheur suive un virage à droite ou un virage à gauche (HICHEUR, VIEILLEDENT et BERTHOZ, 2005 ; HOLLANDS, SORENSSEN et PATLA, 2001) et l'amplitude de déviation de la tête est proportionnelle à la courbure du virage (HICHEUR et al., 2007 ; SREENIVASA et al., 2008). Lorsque le sujet se déplace dans un environnement dont la configuration est inconnue au préalable, on constate alors un nombre plus important de changements de direction de la tête des sujets par rapport à ceux de la trajectoire globale du corps (PATLA, TOMESCU et ISHAC, 2004). Les rotations de la tête ne conduisent pas irrémédiablement à une modification de l'orientation du corps du sujet. L'anticipation de la tête conduisant à une réorientation du corps s'inscrirait alors dans un objectif global locomoteur.

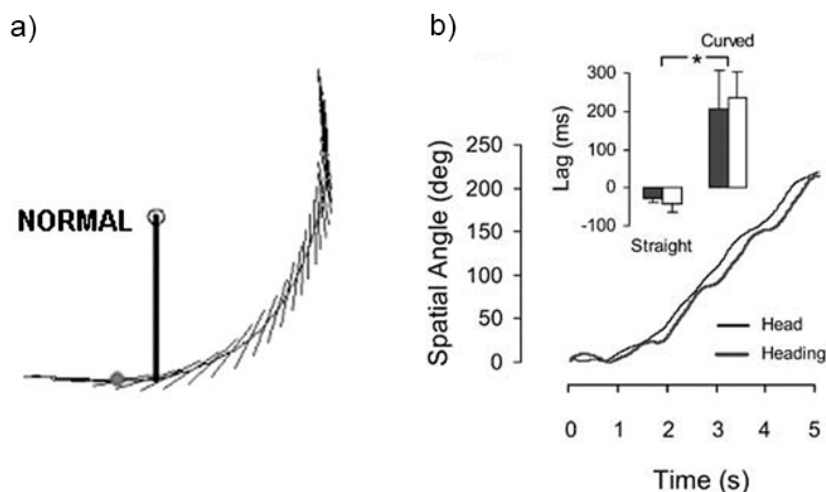


FIGURE 2.3 – Anticipation de la tête sur les réorientations de la direction de la trajectoire de marche décrite par Prévost et al. (a) et Courtine et Schieppati (b) en 2003.

La majorité des auteurs s'accorde ainsi à dire qu'il existe un contrôle hiérarchique du mouvement qui s'effectue d'une façon "top-down". La tête est ainsi contrôlée en respectant la direction du mouvement et ses mouvements anticipateurs, coordonnés au regard, fournissent au système nerveux central une image stable de référence, par acquisition à l'avance d'informations sur l'endroit vers lequel se dirige le marcheur, pour réorienter le reste du corps (GRASSO et al., 1996 ; PRÉVOST et al., 2003). La tête serait alors un référentiel mobile naturel pour le mouvement puisqu'elle présente deux systèmes

fondamentaux pour l'orientation spatiale et la perception de la direction, à savoir le système visuel et le système vestibulaire (POZZO et al., 1990). Elle jouerait alors le rôle d'une plate-forme inertielle pour le guidage de la locomotion (POZZO et al., 1990). Le regard s'inscrit alors dans la stratégie de réorientation "top-down" du corps durant un changement de direction de la locomotion (GRASSO et al., 1998b; HOLLANDS, PATLA et VICKERS, 2002; IMAI et al., 2001). Les mouvements de rotation des yeux, de la tête et du corps selon les trois axes maintiennent le regard dans la direction du mouvement vers l'avant en ligne droite et dirigent le regard de façon proactive vers la direction à venir durant le virage (IMAI et al., 2001). Avant et après la phase de changement de direction, la tête et le regard sont ainsi alignés avec la direction de marche en cours (HOLLANDS, PATLA et VICKERS, 2002). Juste avant le changement de direction du corps, des saccades oculaires sont effectuées afin d'aligner le regard sur le point final du chemin à suivre (HOLLANDS, PATLA et VICKERS, 2002). Ce réalignement du regard est accompagné par la réorientation de la tête qui s'effectue en général de façon simultanée. Les sujets fixent du regard leur point d'arrivée jusqu'à temps que la tête soit alignée avec la nouvelle direction (HOLLANDS, PATLA et VICKERS, 2002).

Ainsi, le contrôle du mouvement lors d'un changement de direction serait à associer avec une stratégie : "je vais là où je regarde" et non "je regarde là où je vais" (GRASSO et al., 1996; PRÉVOST et al., 2003). La réorientation de la tête ne jouerait alors pas seulement une fonction anticipatrice. Elle aurait un rôle actif dans le guidage du corps vers la future direction (HOLLANDS, SORENSSEN et PATLA, 2001) en fournissant une image de référence pour le contrôle et la réorientation du corps (GRASSO et al., 1996, 1998b; HOLLANDS, SORENSSEN et PATLA, 2001; PRÉVOST et al., 2003). Afin d'apporter un regard complémentaire à cette théorie de contrôle "top-down", nous allons à présent considérer la marche en virage selon une référence podale.

Changement de direction et stratégies de poses de pieds

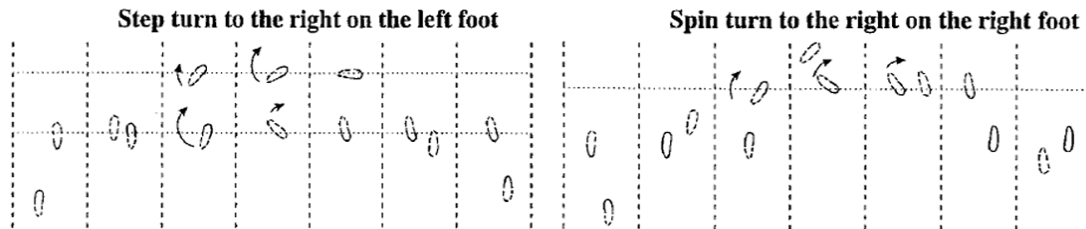


FIGURE 2.4 – Deux grandes stratégies de poses de pieds pour tourner (HASE et STEIN, 1999).

Le changement de direction de la locomotion n'intervient pas à n'importe quel instant. Patla et al. ont ainsi mis en avant le fait qu'il était impossible de changer la direction si le signal déclenchant le virage était donné à la fin de la phase d'appui (PATLA et al., 1991). Cette incapacité à changer de direction dans un même pas ne serait pas liée au temps de réaction mais plutôt à une inhabileté musculaire à tourner simultanément le corps et le déplacer le long de l'axe médiolatéral. Les auteurs concluent que pour réduire la vitesse de marche sans arrêter la tâche locomotrice, le changement de direction doit être réalisé au moins un pas à l'avance. Alors qu'une absence de stéréotypie concernant les endroits de poses de pieds a été démontrée pour réaliser un virage (HICHEUR et al., 2007), il semble néanmoins qu'on puisse caractériser l'initiation du virage par deux grandes stratégies au niveau des poses de pieds au sol selon que le pied d'appui en avant pour initier le virage soit opposé ou non à la direction dans laquelle tourne le sujet et ceci pour des angulations de virage de 30° et 60° (PATLA et al., 1991), 90° (TAYLOR, DABNICKI et STRIKE, 2005) ou 180° (HASE et STEIN, 1999). Ces deux cas particuliers sont appelés le "step turn" et le "spin turn". Lors d'un "step turn", le changement de direction s'effectue dans le sens opposé au pied d'appui. Autrement dit, le marcheur tourne à droite avec le pied gauche initiant le changement de direction ou à gauche avec le pied droit initiant le changement de direction. La jambe d'appui est placée de façon légèrement médiale devant la jambe controlatérale et le pied pointe vers l'intérieur du virage. La jambe controlatérale se déplace alors vers l'intérieur afin d'atteindre la nouvelle direction. Le pied d'appui conserve son orientation médiale de telle sorte que, durant la phase de poussée, la jambe qui a initié le virage se déplace dans la bonne direction, se réorientant durant la phase

d'oscillation plutôt que dans la phase d'appui. Lors d'un "spin turn", le marcheur tourne du même côté que le pied d'appui. Dans ce cas, il tourne à droite avec le pied droit initiant le changement de direction ou à gauche avec le pied gauche initiant le changement de direction. Le "spin turn" permet au corps de pivoter sur la jambe d'appui. Cette jambe d'appui est alors considérée comme l'axe de rotation (HASE et STEIN, 1999). Le tronc est en retrait par rapport à la jambe d'appui afin de contre-balancer les forces centripètes liées à la rotation du corps et afin de produire un pas vers la nouvelle direction. Cette stratégie doit alors être mise en place avant que le centre de masse soit au-dessus de la jambe d'appui. De façon générale, elle se déroule au milieu de la phase d'appui. Ces différentes stratégies de poses de pieds pour initier le virage sont illustrées par la figure 2.4.

Ces stratégies impliquent des caractéristiques cinématiques et dynamiques différentes. D'une manière générale, le "step turn" est une stratégie équivalente à la ligne droite d'un point de vue de la demande musculaire. Elle offre une base de support plus grande que le "spin turn" (HASE et STEIN, 1999 ; PATLA et al., 1991 ; TAYLOR, DABNICHKI et STRIKE, 2005) ce qui confère à cette stratégie une plus grande stabilité locomotrice. L'espacement plus faible entre les pieds lors du "spin turn" diminue le moment d'inertie ce qui facilite le mouvement de rotation. On observe de ce fait une vitesse angulaire supérieure au niveau du tronc et du pelvis mais cette caractéristique peut augmenter le risque de chute. On peut noter que pour une stratégie "spin turn", caractérisée par une base de support plus petite, il y a une augmentation de la largeur du pas précédant l'initiation de la déviation (PAQUETTE et al., 2008). Les auteurs attribuent cette caractéristique à la préservation de la stabilité.

Enfin, notons que certains auteurs ont mis en avant le rôle essentiel des pieds dans le guidage de la locomotion en s'appuyant sur des paradigmes expérimentaux de marche sur tapis circulaire. Lorsqu'on demande à des sujets de marcher un certain temps (pouvant aller jusqu'à deux heures) sur un tapis circulaire, puis de marcher en ligne droite les yeux fermés, les trajectoires produites sont en réalité circulaires. Les termes de système "podocinétique" et de "podocinétisme après rotation" (PKAR : PodoKinetic After-Rotation) ont été alors introduits (EARHART et al., 2001 ; GORDON et al., 1995 ; WEBER et al., 1998)

Contributions

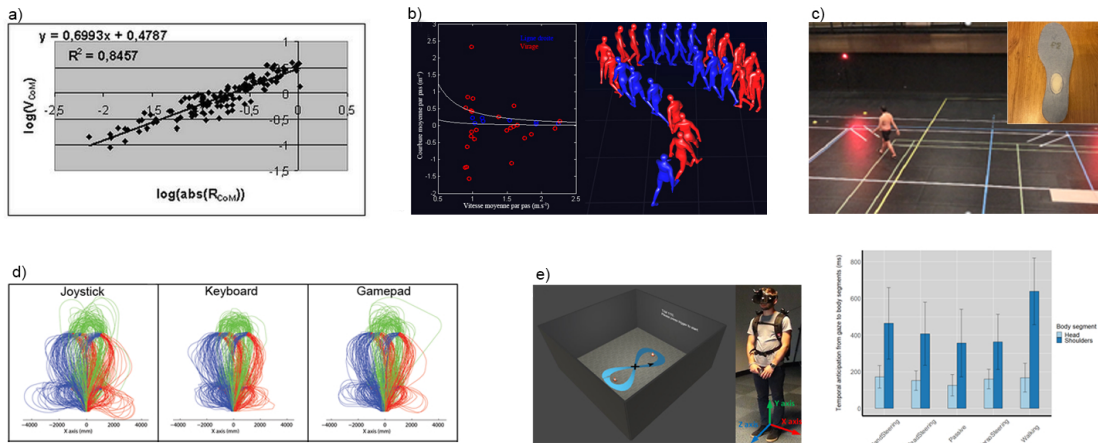


FIGURE 2.5 – Contributions principales sur la thématique de la marche en courbe dirigée vers un but : a) Loi de puissance entre le point de courbure maximum et la vitesse associée lors d'un virage, b) identification des pas en virage grâce à la mise en évidence d'une relation entre la courbure moyenne par pas et la vitesse moyenne par pas en ligne droite c) proposition de nouveaux protocoles de marche en courbe pour évaluer l'effet d'éléments médio-internes sous le pied, d) et e) évaluation de la capacité de la réalité virtuelle à générer des comportements locomoteurs similaires à ceux observés en réel (respectivement concernant la stéréotypie des trajectoires et l'anticipation de la tête sur le changement de direction).

Afin de clore cette section de contexte sur la locomotion en virage, mes contributions scientifiques, en relation avec ce sujet d'étude qui dépasse le cadre des interactions entre marcheurs, sont présentées brièvement ci-après. Tout d'abord, nous avons cherché à vérifier si la relation de puissance, démontrée pour des trajectoires cycliques durant la locomotion (e.g., 5 tours d'ellipse), existait aussi dans un seul virage, condition plus proche de ce que peut réaliser un marcheur dans sa vie quotidienne. Nous avons pu alors montrer un lien fort entre la vitesse et la courbure de la trajectoire (cf. figure 2.5a), mais seulement au niveau du point de courbure maximum (OLIVIER et CRÉTUAL, 2007). Nous avons également proposé une méthode de détection des pas en virage, en mettant en évidence une relation entre la courbure moyenne et la vitesse moyenne par pas en ligne droite (OLIVIER et CRÉTUAL, 2009; OLIVIER et al., 2009, 2011). Tout pas sortant de cette relation est classé comme pas en virage et la distinction entre les stratégies spin turn et step turn peut être automatiquement réalisée (cf. figure 2.5b). Plus récemment, nous cherchons à proposer de nouveaux paradigmes expérimentaux, incluant des analyses

de la locomotion en virage (cf. figure 2.5c) pour explorer les effets d'éléments médio-internes, utilisés par les podologues, et placés sous le pied (PUIL, CRÉTUAL et OLIVIER, 2019). Enfin, nous nous reposons sur les invariants de la marche en courbe comme la stéréotypie des trajectoires locomotrices (CIRIO et al., 2013) ou encore le comportement anticipateur de la tête (BRUMENT et al., 2019) afin d'évaluer les comportements des individus immergés dans des mondes virtuels et confrontés à différentes métaphores d'interaction pour se déplacer dans cet environnement (cf. figure 2.5d et e).

2.1.3 Locomotion dans un environnement encombré

Lorsqu'un marcheur se déplace au quotidien, de nombreuses interactions peuvent être décrites. En particulier, dans le cadre de l'interaction avec d'autres marcheurs, en addition des questions vues précédemment relatives au changement de direction durant la locomotion qui sont liées aux caractéristiques physiques de l'environnement et des buts à atteindre, le marcheur doit également adapter son mouvement afin d'effectuer des tâches de suivi, de marche en groupe ou encore d'évitement de collision. Dans le cadre particulier de nos travaux, nous avons concentré notre attention sur la question de l'évitement de collision par une stratégie de contournement. Nous présenterons ainsi dans les sous-sections suivantes les études ayant considéré cette tâche spécifique.

Notion de risque de collision

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la détection du risque de collision par le système visuel, système fondamental permettant d'obtenir des informations à l'avance sur l'environnement entourant le marcheur. Selon Cutting et al. (1995), l'observateur doit répondre à deux questions : la collision va-t-elle avoir lieu ? Si oui, quand la collision va-t-elle se produire ? Ces deux questions renvoient respectivement à la distance future de croisement, et au temps restant avant la collision.

Afin de répondre à la première question, il a été suggéré que l'évolution de l'angle de gisement était un invariant permettant de détecter le fait qu'une collision soit susceptible de se produire (CUTTING, VISHTON et BRAREN, 1995). L'angle de gisement est défini de la manière suivante : lorsque l'observateur regarde l'obstacle, c'est l'angle formé entre la direction du regard et sa direction de marche . Ainsi, lorsque des sujets marchent selon une trajectoire linéaire, si la dérivée de l'angle de gisement est nulle, alors il existe un risque futur de collision si aucune adaptation de mouvement n'est réalisée (cf. figure 2.6a). Si la dérivée de l'angle de gisement est positive (i.e., l'angle augmente), alors l'observateur sera le premier à passer au croisement (cf. figure 2.6b). A l'inverse, si la dérivée de l'angle de gisement est négative, l'observateur sera second (cf. figure 2.6c).

Une fois la collision détectée, il est alors nécessaire de déterminer quand cette dernière va avoir lieu. Le flux optique généré par le déplacement d'un sujet ou d'un objet de

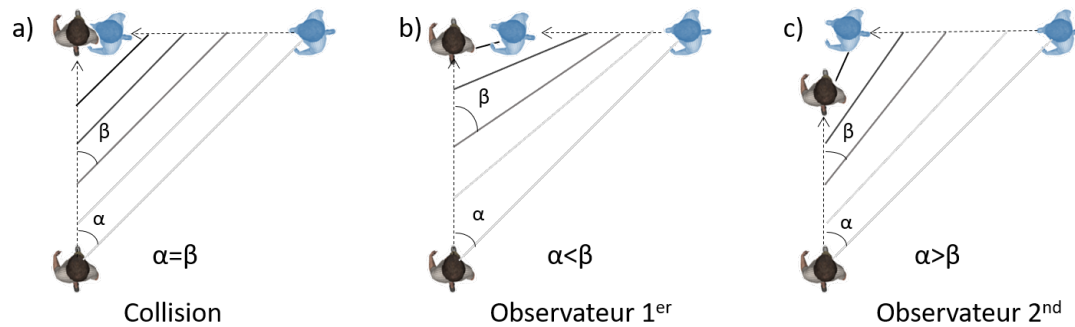


FIGURE 2.6 – Détermination du risque de collision du point de vue de l'observateur grâce à l'angle de gisement, c'est-à-dire l'angle formé entre sa direction du regard vers l'obstacle (en bleu) et la direction de sa marche. a) Si cet angle est constant au cours du temps, l'observateur risque une collision avec l'obstacle, b) lorsqu'il augmente, l'observateur passera devant l'obstacle au croisement, c) et lorsqu'il diminue, l'observateur passera derrière (adapté de Cutting et al. (1995)).

l'environnement serait alors capable de fournir l'information nécessaire pour estimer le temps restant avant le contact (TTC) (LEE, 1976). Le TTC est le temps restant avant qu'un objet ou un individu entre en collision avec l'observateur. Le TTC est un paramètre essentiel correspondant à un instant précis de l'action. Il permet à l'observateur de planifier et de synchroniser ses mouvements afin d'atteindre par exemple un point précis de l'espace à l'image de la planche d'appel au saut en longueur (LEE, 1982) ou de provoquer une collision avec un objet, dans une tâche d'interception ou de frappe de balle (LEE et YOUNG, 1985 ; LEE et al., 1983 ; PEPER et al., 1994). Les auteurs ont même relevé son utilisation chez l'animal, permettant par exemple aux fous de Bassan d'adapter la position de leurs ailes avant de plonger dans l'eau (LEE et REDDISH, 1981).

Lee (LEE, 1976, 1980 ; LEE et YOUNG, 1985 ; LEE et al., 1983) a été le premier auteur à proposer une définition du TTC, en s'appuyant sur la variable optique tau (τ). Cette variable correspond à l'inverse du taux relatif d'expansion sur la rétine d'un objet approchant à vitesse constante sur un chemin de collision. De nombreuses approches et débats ont ensuite été proposés concernant la détermination et l'utilisation du TTC dans la détection des collisions et la régulation du mouvement (BENGUIGUI, RIPOLL et BRODERICK, 2003 ; FAJEN, 2005 ; KAISER et MOWAFI, 1993 ; LEE, PORT et GEORGOPOULOS, 1997 ; PORT et al., 1997 ; REGAN, 2002 ; RUSHTON, 1999 ; TRÉSILIAN, 1991 ; TRESILIAN, 1999 ; WANN, EDGAR et BLAIR, 1993 ; YILMAZ et WARREN, 1995).

Ainsi, la vision est une fonction fondamentale qui permet durant la locomotion de détecter si une collision va avoir lieu mais également d'estimer l'instant auquel cette dernière va avoir lieu. Le calcul du temps restant avant un contact est soumis à débat en ce qui concerne la nature des variables utilisées. Il n'en demeure pas moins que c'est un critère nécessaire à la préservation de la sécurité d'un sujet qui marche. Nous allons à présent nous attacher à la description d'une notion importante impliquée dans la négociation de l'évitement d'obstacle, qui repose sur des aspects spatiaux et qui concerne la notion d'espace personnel.

Préservation d'un espace personnel



FIGURE 2.7 – Illustration de différentes distances sociales ((a) intimes, b et c) personnelles) mises en jeu durant les interactions entre personnes (HALL, 1966), page 48.

La tâche d'évitement de collision est fortement liée à la notion de proxémie. L'exploration de cette thématique débuta dans les années 60 par une approche interdisciplinaire dans le but de comprendre les comportements complexes des humains dans les foules. Cette notion caractérise la perception de l'espace par les individus et l'usage qu'ils en font (HALL, 1963 ; HALL, 1966). Hall (1966) caractérisa 3 types de distances, associées à des normes sociales, et observées dans des conditions statiques. Tout d'abord la distance intime, pour laquelle l'individu peut ressentir la chaleur corporelle de l'autre (Figure 2.7a). Puis la distance personnelle (Figure 2.7 b et c), décomposée en un espace proche et un espace péri-personnel, à l'image d'une "bulle protectrice" qui, si elle est franchie provoque un inconfort. Enfin, la distance extrapersonnelle, qui est extérieure à cette bulle et dépasse la limite de la dominance physique.

Il a alors été montré que ces normes de distances sociales sont influencées par des aspects culturels, (HALL, 1963), le genre des individus en interaction (BRADY et WALKER, 1978) ou encore l'âge (REMLAND, JONES et BRINKMAN, 1995).

Gérin-Lajoie et al. (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005) remarquent que seules des approximations de la taille de cet espace ont été effectuées que ce soit grâce à des photographies de personnes marchant les unes derrière les autres dans la même direction (FRUIN, 1971) ou à partir de valeurs anthropométriques générales concernant l'excursion des membres (TEMPLER, 1992). Les auteurs ont donc proposé de quantifier cet espace de façon expérimentale dans le cas d'une tâche d'évitement d'obstacle représenté par un mannequin monté sur un rail, chez de jeunes adultes dans différentes conditions (mannequin immobile ou mobile, simple ou double tâche ...). Dans cette tâche d'évitement, le sujet passait toujours second au croisement et laissait toujours le mannequin sur sa gauche. La méthode de quantification de l'espace personnel est illustrée par la figure 2.8.

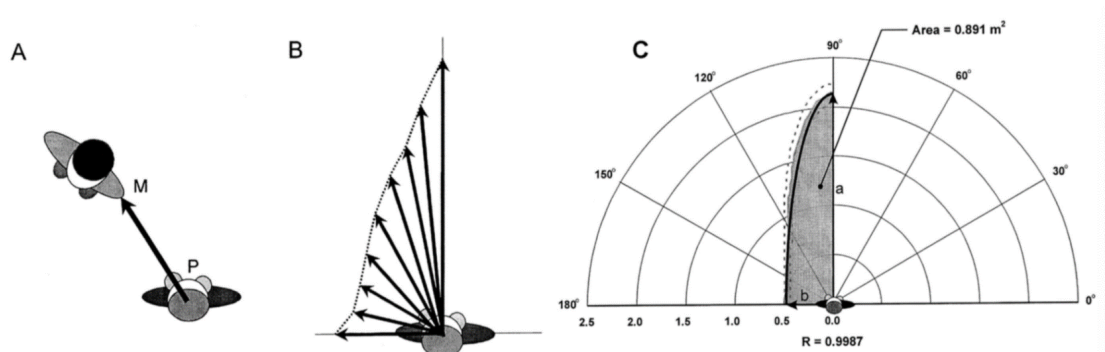


FIGURE 2.8 – Quantification de l'espace personnel durant la locomotion lors de l'évitement d'un obstacle. La distance transversale entre le centre de masse du sujet et l'épaule gauche du mannequin (A) permet de définir le contour de l'espace personnel (B). Ceci est effectué en déterminant la distance transversale la plus courte pour chacun des 90 vecteurs situés dans une aire de balayage centrée sur le sujet. L'espace personnel ainsi obtenu correspond à l'équation d'une ellipse (C) (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005).

Tout d'abord, une aire de balayage est définie dans le plan transversal, devant le sujet et ceci à l'intérieur du quart supérieur gauche d'un cercle centré sur le centre de masse du sujet. Ce quart de cercle est alors composé de 90 vecteurs, exprimés en coordonnées

polaires. Ensuite, la distance transversale entre le centre de masse du sujet et l'épaule gauche du mannequin (figure 2.8A) est calculée à chaque instant. Cette dernière permet de déterminer, pour chaque vecteur de l'aire de balayage, la plus courte distance séparant le sujet du mannequin et permet ainsi l'obtention du contour de l'espace personnel dans ce quart supérieur gauche (figure 2.8B). L'espace personnel ainsi obtenu pour l'ensemble des sujets et des conditions correspond alors à une ellipse (figure 2.8C) dont la dimension longitudinale et latérale est respectivement de 2,11m et 0,48m. Le fait que la distance longitudinale de cette ellipse soit supérieure à la distance latérale prend son sens dans le fait qu'elle permet au sujet d'avoir suffisamment de temps pour percevoir et s'adapter aux menaces possibles de l'environnement. Dans ce cas, la distance latérale permet d'éviter toute collision, sans entrer à aucun moment en contact avec un obstacle. Ces résultats peuvent être mis en relation avec la région ovale de sécurité introduite par Goffman pour laquelle la distance longitudinale permet l'anticipation et la distance latérale permet au piéton de garantir une certaine aisance lors du croisement d'un obstacle (GOFFMAN, 1971). Les sujets préservent ainsi de manière systématique un espace personnel de forme elliptique dont la taille varie selon la demande de traitement informationnel que nécessite l'environnement encombré. Par exemple, si un message auditif détourne leur attention, l'espace personnel s'élargit de telle sorte que la demande attentionnelle, liée à la présence d'un obstacle, diminue. Par ailleurs, lorsque le mouvement du mannequin est connu à l'avance, les sujets ont le temps de planifier un espace personnel assez large qui permet d'attribuer moins d'attention au mannequin. Lorsqu'on s'intéresse à l'influence de l'âge sur cet espace, il a été montré que des personnes âgées préservent un espace personnel similaire à celui de personnes plus jeunes, sauf si on applique des phénomènes distracteurs durant la locomotion (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2006). Suite à une perturbation auditive, comme nous venons de le voir, la taille de l'espace personnel augmente, mais de façon plus prononcée chez les personnes âgées. De plus, même si la taille de cet espace est identique dans des conditions normales de marche face à un obstacle, cette distance représente un nombre de pas plus élevé chez les personnes âgées, leur laissant plus de temps pour s'adapter. Cet espace personnel serait alors un critère de contrôle utilisé par le système locomoteur afin de planifier les adaptations de

démarche inhérentes au contexte environnemental. Les auteurs ont approfondi ces études en s'interrogeant sur le caractère symétrique de cet espace, mais aussi sur le rôle de la vitesse de marche et du caractère réel ou virtuel de l'obstacle (GÉRIN-LAJOIE et al., 2008). Le protocole expérimental concerne alors le contournement par la droite ou la gauche d'un obstacle statique. L'espace personnel serait alors plus petit du côté dominant du sujet ; les auteurs lient ce résultat au fait que le côté dominant est caractérisé par un traitement plus rapide de l'information (COREN et PORAC, 1982), nécessitant donc moins de temps pour réagir. La taille et la forme de cet espace ne seraient pas influencées par la vitesse de marche ni par le fait que les obstacles soient réels ou virtuels. Les études de Gérin-Lajoie et al. soulignent ainsi le caractère fondamental de l'espace personnel pour le contrôle de la navigation. A ce titre, Woods et al. utilisent le terme d'"enveloppe de collision" pour nommer la distance qui sépare le sujet du périmètre d'un obstacle et qui dépendrait de la perception interne d'une distance de passage sécuritaire (WOODS et al., 2003).

Durant la tâche d'évitement d'obstacle lors de la locomotion, les individus préservent un espace de sécurité appelé espace personnel. Cette zone autorise un délai suffisant pour détecter et réagir à toute perturbation extérieure. On peut donc reconsidérer la question de Cutting et al. (1995) concernant la détection de collision. La réponse à cette question ne correspondrait alors pas seulement à détecter si une collision, au sens de contact entre les enveloppes corporelles va avoir lieu, mais plutôt si l'obstacle va se trouver dans l'espace personnel du marcheur. Nous allons à présent nous intéresser aux adaptations réalisées par le marcheur pour éviter la collision en considérant dans un premier temps le cas d'un obstacle immobile puis le cas d'un obstacle mobile

Évitement d'un obstacle immobile

Vallis et McFadyen (2003) ont considéré la façon dont un sujet contourne un obstacle infranchissable (un cylindre de 2 mètres de haut et 0,23m de diamètre) placé sur son parcours en ligne droite avec l'intention de continuer dans la direction initiale. Ils ont mis ainsi en avant des ajustements locomoteurs anticipateurs trois pas avant le passage de l'obstacle mais pas durant le croisement à proprement dit : le marcheur ne modifierait pas sa longueur de pas, mais plutôt sa largeur de pas avant de croiser un obstacle, et ceci

par rapport à une situation contrôle, en ligne droite, sans obstacle. Les auteurs ont alors observé un déplacement médiolatéral du centre de masse d'un peu plus de 50cm, ce qui est beaucoup plus élevé que le déplacement lié à l'alternance des pas en ligne droite qui correspond à des valeurs proches de 7cm. Les auteurs ont souligné par ailleurs que la vitesse d'approche est constante. Gérin-Lajoie et al. (2005) ont également mis en avant des ajustements locomoteurs anticipateurs lors de l'évitement d'un mannequin statique placé sur le trajet du sujet. Ils ont distingué deux phases dans l'évitement d'obstacle :

1. une phase d'anticipation, caractérisée par une déviation de la trajectoire initiale six pas avant la rencontre de l'obstacle, appelée étape précoce de planification, et par un ajustement de la trajectoire durant la dernière foulée, qui correspond à une étape tardive de planification liée à une estimation finale de l'action du mannequin et de sa position d'arrivée.
2. une phase d'effacement qui est la phase pendant laquelle le marcheur croise l'obstacle.

En accord avec l'étude précédente (VALLIS et MCFADYEN, 2003), les auteurs suggèrent que la trajectoire du centre de masse serait alors contrôlée grâce à une stratégie au niveau du bas du corps avec une modulation de la largeur de pas pour un contrôle médiolatéral de la trajectoire. Cette stratégie est initiée à une distance constante de l'obstacle. Durant la phase d'effacement, le sujet passe à une distance constante de l'obstacle égale à un tiers de la longueur de pas des sujets, nous renvoyant ainsi à la notion d'espace personnel.

Par ailleurs, le contournement de l'obstacle fixe induit deux stratégies de pose de pieds, utilisées dans les mêmes proportions (VALLIS et MCFADYEN, 2003) : la stratégie "lead out" et la stratégie "lead in". La première signifie que, lorsque le sujet passe l'obstacle, la jambe en avant est éloignée de ce dernier alors que pour la seconde, la jambe en avant est proche de l'obstacle. Un même marcheur utiliserait une stratégie pour contourner l'obstacle selon un côté donné, mais cette combinaison varie selon les marcheurs. Ceci suggère que lorsque la trajectoire locomotrice n'est pas contrainte, les marcheurs conserveraient une même stratégie posturale pour l'approche et le contournement de l'obstacle.

Un point à souligner est que contrairement à une tâche de changement de direction, la tête n'anticipe pas le mouvement de réorientation par rapport au reste du corps (VALLIS et MCFADYEN, 2003). Le sujet ne met pas en place une coordination stéréotypée du haut du corps avant la déviation du centre de masse. Les hypothèses émises pour expliquer ce comportement mettent en avant le fait que le déplacement simultané de la tête et du tronc permettrait de mieux orienter le corps pour contourner l'obstacle en sécurité et fournit une plate-forme stable pour la tête en réduisant le nombre de degrés de liberté qui doivent être initialement contrôlés par le système nerveux central. La masse du tronc représentant une partie importante de la masse du corps, ce déplacement simultané du tronc pourrait assister les déviations du centre de masse vers la nouvelle direction transitoire à travers le mouvement des membres inférieurs.

Après avoir considéré le cas de l'interaction entre un marcheur et un obstacle statique, nous allons à présent nous intéresser au cas de l'évitement de collision avec un obstacle mobile.

Évitement d'un obstacle mobile

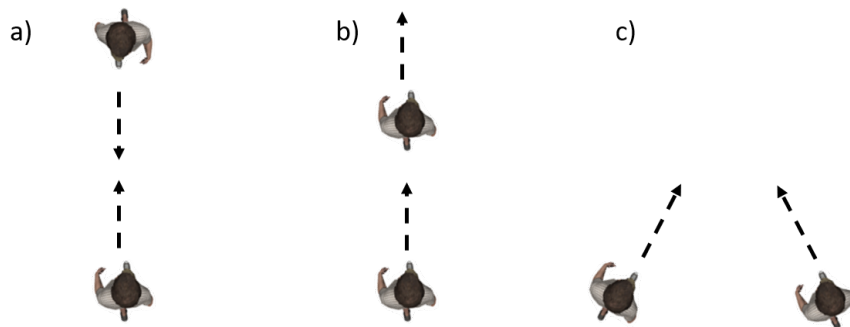


FIGURE 2.9 – Trois types de collision avec un obstacle mobile : a) les marcheurs arrivent face à face, b) les marcheurs sont l'un derrière l'autre, c) les marcheurs ont des trajectoires sécantes (adapté de Rymill et Dodgson 2005).

Trois types de collision entre deux individus qui se déplacent, illustrés par la figure 2.9, ont été décrits dans la littérature (RYMILL et DODGSON, 2005) :

- "towards collision" : deux individus se déplacent en sens opposé sur un chemin de collision,

- "away collision" : un individu rattrape un autre individu marchant dans le même sens que lui mais à une vitesse plus faible,
- "glancing collision" : deux individus marchent avec des trajectoires sécantes.

Les paradigmes expérimentaux, que nous allons décrire ci-après, et qui ont été développés dans ce cadre (jusque 2008) ont principalement considéré les situations "towards collision" et dans certains cas "glancing collision". Par ailleurs, concernant les caractéristiques de mouvement de l'obstacle mobile, il était de nature passive car ce dernier suivait une trajectoire prédéfinie à l'avance, sans déviation possible en fonction des actions du marcheur (CINELLI et PATLA, 2007 ; GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005). Un second type d'interaction peut être envisagé, à savoir l'interaction entre deux marcheurs. Dans ce deuxième cas, à la date de 2008, on peut seulement relever l'étude de Ducourant et al. (2005). Ce n'est pas une étude qui s'intéresse directement à l'évitement de collision : les auteurs se sont focalisés sur les coordinations interpersonnelles qui se mettent en place lorsque deux sujets marchent simultanément. Ils se placent plus précisément dans une situation de marche contrainte (en avant ou en arrière). Les sujets étaient face à face et suivaient des rôles préalablement définis : un leader et un suiveur. Le leader cherchait à briser la distance qui le sépare de l'autre sujet, alors que ce dernier, le suiveur, cherchait à maintenir cette distance constante. Les résultats ont montré que la réponse locomotrice du suiveur apparaissait après un certain délai, dont la durée augmentaient avec la distance séparant les deux sujets. Les auteurs ont conclu que pour effectuer des trajectoires dites "sociales", les individus utilisent des mécanismes liés au leadership et à la distance entre les sujets. La réponse locomotrice des sujets n'est pas une reproduction des actions de l'autre après un court délai mais se fonde plutôt sur une interprétation du mouvement et une prédiction des intentions de l'autre. Les auteurs parlent alors d'imitation de haut niveau avec une interaction bidirectionnelle et des influences mutuelles entre les sujets. Cette étude est très intéressante dans la compréhension des mécanismes vastes d'interaction entre deux piétons. Malgré tout, les conditions d'études sont très contraintes puisque les sujets ne pouvaient se déplacer qu'en grande partie sur l'axe antéro-postérieur et ne suffit pas à expliquer la façon dont un individu va éviter un obstacle mobile.

Revenons au cas où le marcheur se retrouve face à un obstacle mobile passif. Pour Gérin-Lajoie et al., le mouvement de ce type d'obstacle mobile, matérialisé par un mannequin sur un rail, qui se déplace sur un chemin de collision de façon latérale à 45° et dont le mouvement peut être connu ou inconnu *a priori*, résulte en une adaptation de la démarche du marcheur qui vise à gagner du temps pour évaluer sa situation par rapport à un obstacle fixe (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005). Ainsi, le marcheur diminue sa vitesse de marche lorsqu'il doit contourner un obstacle mobile. Les auteurs suggèrent que ce serait la conséquence d'une augmentation du processus de traitement visuel nécessaire à la réussite de la tâche. Les phases d'anticipation et d'effacement ont été également décrites dans le cas de l'évitement d'un obstacle mobile. Notons que les situations expérimentales faisaient en sorte que le marcheur était implicitement contraint à passer derrière l'obstacle mobile dans la mesure où ce comportement d'évitement serait plus naturel (CUTTING, VISHTON et BRAREN, 1995) (nous reviendrons sur la question de l'ordre de passage dans la présentation de mes travaux de recherche). Lorsque la trajectoire de l'obstacle mobile n'était pas connue *a priori*, il n'y avait pas de différence significative en ce qui concerne les adaptations du marcheur dans le plan médiolatéral entre une situation avec un obstacle fixe ou mobile : la déviation du centre de masse s'effectuait à la même distance de l'obstacle selon le même pattern de largeur de pas y compris lors de la phase d'effacement. La différence majeure entre ces situations résidait dans la vitesse de déplacement durant la phase d'anticipation qui était fortement diminuée dans le cas d'un obstacle mobile. Lorsque la trajectoire de l'obstacle mobile était connue *a priori*, les adaptations locomotrices anticipatrices pour contourner un obstacle étaient facilitées et la modulation de la largeur de pas était alors redistribuée sur l'ensemble des pas. Lorsque la trajectoire était inconnue, cette modulation était plus prononcée durant la phase tardive de planification voire même s'étendait sur la phase d'effacement. La phase tardive de planification, qui présentait les plus grands ajustements des pas, pourrait correspondre selon les auteurs à une phase finale de prise de décision, basée sur la position et le mouvement du mannequin.

Cinelli et Patla (CINELLI et PATLA, 2007) se sont intéressés quant à eux à l'évitement d'un obstacle mobile arrivant, selon différentes vitesses, face au marcheur. Le marcheur

et l'obstacle étaient séparés de 12m et des cellules photoélectriques déclenchaient le mouvement du mannequin lorsque le marcheur avait parcouru 2,5m, ce qui lui permettait d'acquiescer un état stable à vitesse de confort. Le design expérimental consistait en deux configurations. Dans la première configuration, le mouvement du marcheur était libre et ce dernier devait rejoindre un point d'arrivée (figure 2.10A). La seconde configuration contraignait le mouvement du marcheur en l'obligeant à passer à travers une porte de 90cm de largeur, placée à 3,5m des cellules photoélectriques (figure 2.10B). Cette configuration a été mise en place dans l'idée qu'elle pourrait faire prendre au sujet une décision concernant le TTC afin de savoir s'il doit passer la porte avant ou après le passage de l'obstacle. Les auteurs ont ainsi montré que pour la première configuration, les

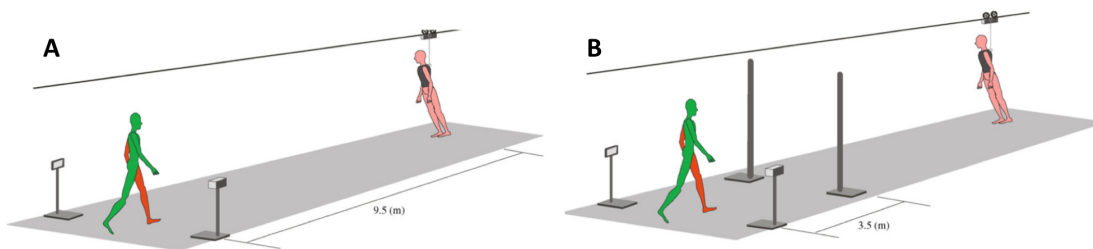


FIGURE 2.10 – Protocole expérimental pour l'analyse de l'évitement de collision avec un obstacle mobile arrivant face au sujet dans a) une tâche non contrainte et b) dans une tâche contrainte par une porte de 90cm de largeur (CINELLI et PATLA, 2007).

marcheurs déclenchaient leur adaptation de trajectoire à une distance constante du point de départ ($\approx 1,5\text{m}$), indépendamment de la vitesse de l'obstacle. Pour chaque vitesse, le sujet croisait l'obstacle à une distance latérale constante ($\approx 45\text{cm}$). Cependant, la vitesse de déviation médiolatérale dépendait de la vitesse d'approche de l'obstacle : plus l'obstacle se déplaçait vite, plus la déviation médiolatérale s'effectuait rapidement. Dans la deuxième configuration, le changement était initié plus loin, avant le passage de la porte ou juste au niveau de la porte, et ceci de façon plus marquée pour des vitesses d'obstacles lentes ($0,8\text{m.s}^{-1}$) par rapport à des vitesses rapides (2 et $2,2\text{m.s}^{-1}$). Ceci signifierait selon les auteurs que dans une situation présentant une référence spatiale, les sujets seraient capables de moduler l'initiation de la déviation médiolatérale de leur trajectoire en fonction de la vitesse de l'obstacle. Les auteurs ont alors suggéré qu'un marcheur

est capable de déterminer le temps restant avant d'entrer en collision avec un objet mobile et les adaptations locomotrices mises en place durant l'évitement dépendraient des contraintes de la tâche. Les auteurs ont ensuite étendu leur protocole en faisant cette fois-ci varier la position de la contrainte spatiale (position de la porte avant, après ou au niveau du point de collision théorique) (CINELLI et PATLA, 2008). Ils ont alors montré que les manœuvres d'évitement de collision étaient réalisées en deux étapes avec d'abord une modification de la direction de la marche puis de la vitesse de marche. Le placement de la porte, contrairement à la vitesse de l'obstacle comme démontré précédemment, modifiait l'instant d'initiation de l'évitement de collision. La modification de la direction de la marche débutait plus tard si la porte était placée avant la collision. Pour les auteurs, malgré le fait qu'une référence spatiale permettrait de mener des jugements plus précis sur les vitesses relatives et déterminer si les individus passeront la porte avant la collision théorique, il y aurait une incertitude sur le fait que l'espace derrière la porte soit suffisant pour mener une manœuvre d'évitement adaptée.

Pour terminer cette partie sur l'évitement de collision, nous pouvons faire référence à l'article de Warren et Fajen (2008) qui ont proposé une revue des modèles de navigation développés par leurs groupes pour simuler le mouvement du marcheur dans un environnement en interaction avec des buts à atteindre, et des obstacles statiques et mobiles. Le couple marcheur-environnement est alors modélisé comme un système dynamique couplé : la trajectoire du marcheur résulte de l'ensemble des forces qui agissent sur lui, les buts étant considérés comme des attracteurs vers lesquels les trajectoires convergent et les obstacles sont assimilés à des répulseurs et correspondent à des états à éviter autour desquels les trajectoires divergent. Ce modèle est basé sur la distance aux buts et obstacles ainsi que sur le changement de signe de l'angle de gisement.

2.2 Objectifs de ma recherche

Le cadre théorique dans lequel mes travaux de recherche ont été initiés montre l'intérêt majeur de considérer l'interaction entre un individu et son environnement. Ces interactions sont variées et complexes, allant d'un changement de direction (la littérature est riche à ce sujet) à l'évitement d'une collision avec les différents éléments de l'environnement, dont les autres marcheurs (dont l'étude a reçu beaucoup moins d'attention). Les auteurs ont ainsi porté leur intérêt sur l'identification des invariants perceptifs et moteurs qui permettent de caractériser et comprendre comment un marcheur produit une trajectoire adaptée à son environnement. Cette compréhension est fondamentale, et présente de nombreuses applications, comme par exemple dans le domaine de la santé, pour caractériser les capacités fonctionnelles du patient en interaction avec son environnement, capacités indispensables pour le maintien de son autonomie. Elle offre aussi la possibilité de créer des modèles de mouvement qui pourront être appliqués à des humains virtuels pour des simulations réalistes pouvant être utilisées dans le domaine du cinéma, des jeux vidéos, de l'architecture ou encore pour immerger un utilisateur dans un environnement virtuel peuplé pour créer de nouveaux paradigmes expérimentaux visant à analyser le comportement humain.

Sur la question principale de l'évitement de collision durant la marche par contournement de l'obstacle, les chercheurs ont porté leur attention sur l'analyse de l'évitement de collision avec un obstacle fixe ou bien mobile mais dans un cas très particulier impliquant un mannequin monté sur un rail se déplaçant selon une trajectoire rectiligne à vitesse constante, avec donc un comportement que nous avons qualifié de passif. Ces études ont été fondamentales pour développer des méthodes d'analyse concernant les stratégies d'évitement de collision et pour nourrir les discussions sur la détection des collisions ou encore les variables de régulation de la tâche d'évitement de collision comme la préservation de l'espace personnel. Cependant, aucune d'entre elles n'avait à ce moment considéré la tâche d'interaction entre marcheurs.

Dans ce cadre, mon projet de recherche a considéré l'interaction non verbale entre deux marcheurs et plus particulièrement les coordinations visuo-motrices impliquées, en cherchant à comprendre les indices visuels déclenchant la manœuvre d'évitement de collision et les actions réalisées par le marcheur pour résoudre cette tâche. Mes efforts se sont tout d'abord concentrés sur la définition d'un nouveau paradigme expérimental pour l'étude des interactions entre marcheurs dans une tâche d'évitement de collision mais aussi sur la définition de nouvelles métriques pour quantifier ces interactions. Un premier objectif était d'identifier les conditions qui induisent des adaptations de la trajectoire de marche en s'appuyant sur les travaux de Cutting et al. (1995) mettant en avant la nécessité de détecter l'existence d'une collision future et les travaux de Gérin-Lajoie et al. (2005) montrant que le marcheur ne cherche pas seulement à éviter une collision au sens physique du terme mais aussi à préserver l'intégrité de son espace personnel. Nous nous sommes alors attachés à définir un risque de collision caractérisé par un seuil de distance future de croisement. Un second objectif était d'analyser comment les marcheurs résolvent la tâche d'évitement de collision et notamment de quelle manière chacun des deux marcheurs contribue à la tâche d'évitement de collision. La section 2.3 va ainsi présenter les deux études majeures (OLIVIER et al., 2012, 2013) qui ont permis de définir les fondements de notre approche expérimentale et les métriques d'analyse. Dans un second temps, nous nous sommes rendus compte que nous ne pouvions pas nous contenter de ce cadre expérimental seul car nous avons besoin de plus de contrôle des facteurs manipulés dans l'interaction. Ainsi, un troisième objectif, détaillé dans la section 2.4 a été de valider une plateforme expérimentale, s'appuyant sur les techniques de la réalité virtuelle, afin d'étudier les interactions entre deux marcheurs. Enfin, un dernier objectif, non pas des moindres a été de mieux comprendre les interactions entre marcheurs sous l'angle de l'analyse des effets de différents facteurs d'influence tels que les facteurs situationnels et individuels. Il sera détaillé dans la section 2.5. Pour des questions de lisibilité, certains détails méthodologiques ainsi que les tests statistiques réalisés ne sont pas rapportés dans ce document mais tous les détails sont disponibles dans les différents articles publiés.

2.3 Nouveau paradigme d'étude des interactions entre deux marcheurs

Je vais présenter dans cette section les travaux que nous avons menés afin d'identifier les conditions d'interaction entre deux marcheurs induisant des adaptations de la trajectoire de marche et d'analyser la manière avec laquelle les marcheurs résolvent la tâche d'évitement de collision. Aussi, afin de poser de manière complète cette étude fondatrice sur laquelle s'appuie une partie majeure de mes travaux actuels je présenterai de manière détaillée les variables d'analyse que nous avons proposées. Dans le contexte des études publiées à cette période, nous étions le premier groupe à avoir proposé une situation de croisement entre deux marcheurs et cela dans un grand espace expérimental permettant aux marcheurs d'atteindre une vitesse de confort avant d'avoir la possibilité de se voir et d'interagir.

2.3.1 Participants

La population d'étude était constituée de 30 sujets volontaires, 11 femmes et 19 hommes âgés de 26,1 ans ($\pm 6,9$) et mesurant 174,2 cm ($\pm 9,4$). Chaque sujet a été informé au préalable du déroulement de l'expérimentation et notre étude respectait les règles de la déclaration d'Helsinki. Tous les sujets ont répondu aux critères d'inclusion qui consistaient à ne pas souffrir de problèmes vestibulaires ou neurologiques susceptibles d'affecter leur locomotion.

2.3.2 Paradigme

Afin d'apporter de nouveaux éléments de réponses dans la compréhension des coordinations visuo-motrices impliquées durant l'interaction entre deux marcheurs, nous avons développé un nouveau paradigme expérimental reposant sur une tâche de croisement à 90° entre deux marcheurs (Figure 2.11).

Pour cela, nous avons réalisé nos expériences dans un gymnase à l'intérieur duquel une aire expérimentale de 15m×15m a été définie. Des panneaux occultants (2 m de haut sur 3 m de long), dont le positionnement est illustré sur la figure 2.11, permettaient

aux marcheurs d'atteindre leur vitesse de confort avant toute interaction visuelle avec l'autre marcheur.

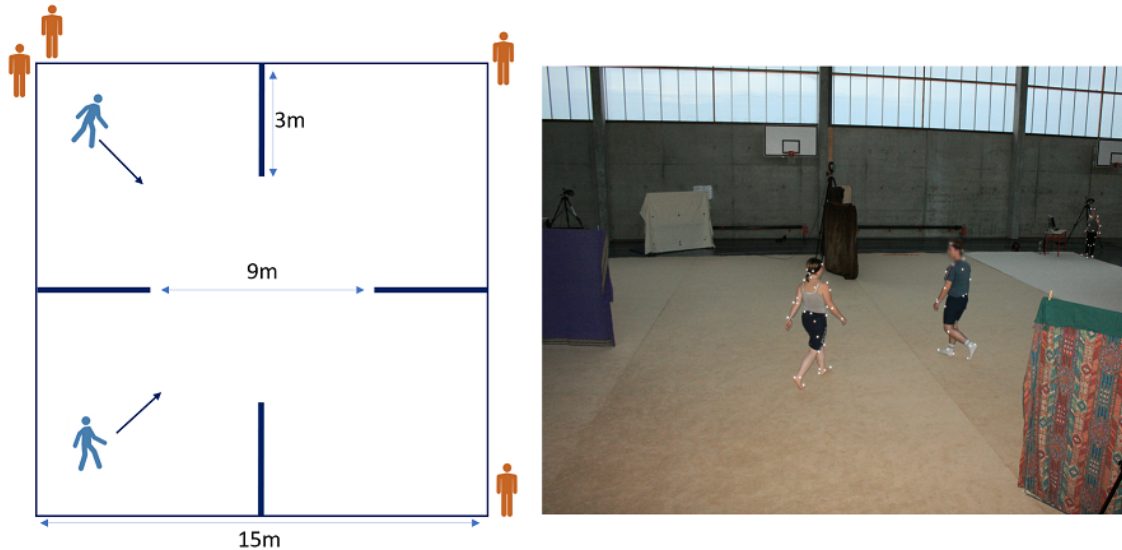


FIGURE 2.11 – Paradigme expérimental de croisement à 90° entre deux marcheurs.

L'objectif étant d'étudier la façon dont deux marcheurs se croisent et pour éviter toute adaptation possible entre deux sujets au fil des essais, et d'anticiper le côté par lequel arrivait l'autre marcheur, six participants étaient mobilisés par session expérimentale. Les participants étaient répartis aux quatre coins de cette aire expérimentale. A chaque essai, 2 participants, dont les positions initiales ne partageaient pas la même diagonale, recevaient l'instruction de marcher vers le coin opposé en évitant toute collision avec l'autre marcheur, sans consigne additionnelle concernant la stratégie locomotrice à adopter. Afin que l'interaction repose principalement sur des éléments visuels, les participants n'étaient pas autorisés à parler pendant l'expérience et ils marchaient pieds nus ou avec des chaussettes sur un tapis pour éviter tout indice auditif. Les participants recevaient un signal de départ affiché sur un écran d'ordinateur placé sur leur droite à chaque coin de départ. En synchronisant les signaux de départ, nous avons provoqué des situations de collisions potentielles sur des trajectoires orthogonales. La variabilité des vitesses naturelles interindividuelles ainsi que les temps de réaction entre le signal et le départ effectif des participants, créaient des conditions d'interactions variables d'un essai à l'autre, permettant d'en étudier leur influence.

Au total, 5 sessions expérimentales ont été menées. Chaque session pour un groupe de six sujets durait une heure, ce qui permettait d'acquérir une centaine d'essais. Au total, 420 essais ont été réalisés.

2.3.3 Hypothèses

Deux grandes hypothèses ont guidé nos analyses :

- H1 : Les adaptations de mouvement des marcheurs en interaction sont liées à l'acceptabilité d'une distance future de croisement
- H2 : La tâche d'évitement de collision est résolue grâce à une adaptation de la trajectoire des deux marcheurs. Cependant, nous faisons l'hypothèse d'une différence de contribution entre les deux marcheurs en fonction de l'ordre de passage au croisement. En effet, le marcheur second au croisement se retrouvera avec le marcheur premier en face de lui alors que le marcheur premier au croisement se retrouvera avec le marcheur second sur son côté ou derrière. Cette asymétrie de configuration au croisement pourrait ainsi induire une asymétrie dans les adaptations de trajectoire, à mettre en lien avec la forme de l'espace personnel, elliptique, de plus grande dimension devant le marcheur que sur ses côtés (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005) (cf. figure 2.12).

2.3.4 Analyse

Traitement des données brutes

Les données de position des participants au cours du temps ont été enregistrées à l'aide de 12 caméras Vicon MX-40 (Oxford Metrics) à une fréquence d'échantillonnage de 120 Hz. Le mouvement global des participants a été calculé comme le milieu de leurs épaules, soit le milieu des deux marqueurs réfléchissants disposés sur leurs acromions. Un filtre passe-bas de type butterworth en deux passes et de troisième ordre, avec une fréquence de coupure de 0.5Hz a été appliqué sur les données de position. La vitesse a été calculée comme la dérivée première du milieu des épaules dans le plan horizontal.

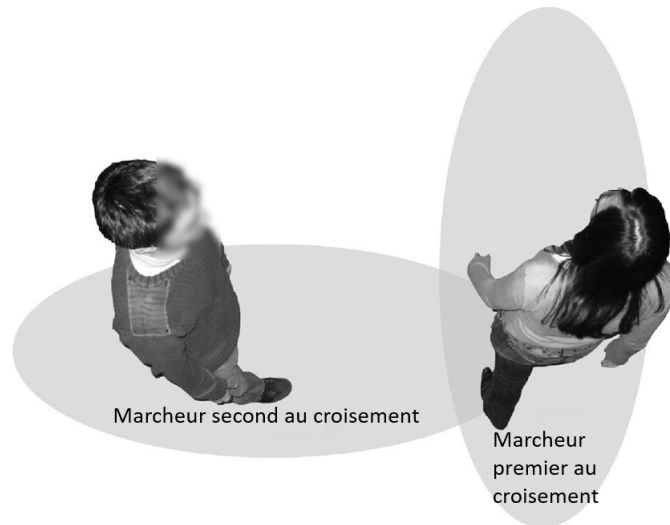


FIGURE 2.12 – Hypothèse d’une asymétrie des contributions de chaque marcheur en fonction de l’ordre de passage au croisement en lien avec la forme de l’espace personnel.

Normalisation temporelle de l’interaction

Nous nous sommes intéressés à une fenêtre temporelle spécifique que nous avons nommée phase d’interaction. Elle débute à partir du moment, appelé *tsee*, où les participants sont en mesure de se voir (ils dépassent les panneaux occultants). Elle se termine au moment du croisement, appelé *tcross*, correspondant à l’instant où la distance entre les marcheurs est minimale. Afin de permettre une analyse comparative des différents essais, nous avons normalisé les séries temporelles sur cette phase d’interaction entre *tsee* (0%) et *tcross* (100%).

Distance minimum prédite (*mpd*) et évitement de collision

En se basant sur l’hypothèse d’une interaction réciproque entre les deux marcheurs, nous avons proposé d’analyser l’interaction grâce à une variable mutuelle appelée distance minimale prédite (*mpd*). A chaque instant, $mpd(t)$, représente la distance théorique à laquelle les marcheurs se croiseront, étant données leur vitesse et orientation à cet instant t , si aucun d’entre eux n’adapte leur mouvement. Dans cette première approche d’analyse, nous avons considéré cette distance comme strictement positive et mesurée entre le milieu des épaules des deux marcheurs (dans les études suivantes, nous avons défini une

variable signée qui tient compte de l'ordre de passage des marcheurs au croisement). En faisant l'hypothèse qu'aucune adaptation de mouvement ne sera réalisée, nous pouvons modéliser les trajectoires futures des marcheurs comme une extrapolation linéaire de leur état courant. Ainsi, la trajectoire de chaque participant est prédite de la manière suivante :

$$P_{pred,n}(t, u) = P_n(t) + (u - t)V_n(t) \quad (2.2)$$

avec $P_{pred,n}(t, u)$ la trajectoire prédite du participant n , u un paramètre temporel, $P_n(t)$, la position actuelle du participant n et $V_n(t)$ la vitesse actuelle du participant n .

mpd est alors formulée en calculant à chaque instant la distance minimale entre les positions prédites $P_{pred,1}$ et $P_{pred,2}$ des marcheurs #1 et #2 :

$$mpd(t) = \underset{u}{argmin} \|P_{pred,2}(t, u) - P_{pred,1}(t, u)\| \quad (2.3)$$

L'équation 2.3 peut alors être résolue comme l'argument du minimum d'une équation d'un polynôme du second degré. Si une solution positive est trouvée ($u > 0$), cela signifie que les trajectoires convergent, alors que si la solution est négative, les trajectoires divergent ($u < 0$). Si $u = 0$ alors les trajectoires ont atteint l'instant réel de distance minimale ($dmin$), correspondant à l'instant de croisement effectif entre les marcheurs :

$$mpd(tcross) = dmin \quad (2.4)$$

$dmin$ ne peut pas a priori prendre des valeurs en deçà d'un certain seuil considéré comme acceptable par les marcheurs puisque la distance de croisement semble résulter d'une combinaison entre une distance de contact (i.e., pas de collision entre les enveloppes corporelles) et une distance sociale (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005).

mpd correspond ainsi à la prédiction de $dmin$ étant donné l'état courant des marcheurs en terme de position et de vitesse. $mpd(t)$ varie si et seulement si des adaptations de mouvement sont réalisées par les marcheurs. La figure 2.13a illustre les trajectoires de marche pour un exemple de croisement entre deux marcheurs et en particulier les positions considérées pour l'analyse entre le moment où les marcheurs peuvent se voir et celui où ils se croisent. Sur la base des calculs présentés précédemment, la figure 2.13b montre l'évolution de la distance future de croisement ($mpd(t)$), calculée à chaque

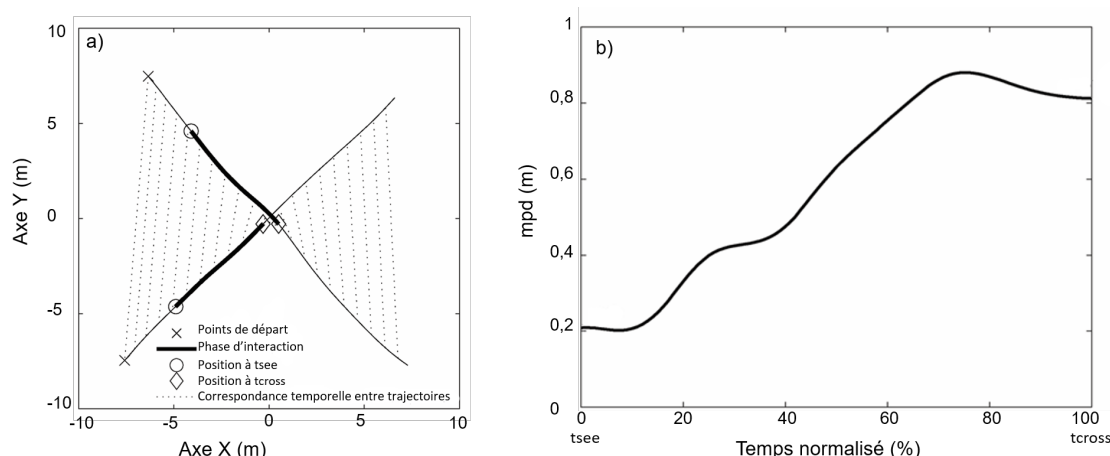


FIGURE 2.13 – a) Exemple de trajectoires de marche réalisées durant l'expérience de croisement à 90° entre deux marcheurs. La ligne épaisse correspond aux positions successives des marcheurs durant la phase d'interaction, définie entre le moment où les marcheurs peuvent se voir jusqu'au moment où ils se croisent. b) Durant la phase d'interaction, nous nous sommes intéressés à l'évolution de la distance future de croisement qui permet de rendre compte du résultat des adaptations de mouvement des marcheurs lors de la tâche d'évitement de collision.

instant de la phase d'interaction. Sur cet exemple on peut remarquer qu'au moment où les deux marcheurs peuvent se voir (t_{see} , 0%), mpd (pour rappel calculée de centre à centre des marcheurs) est égale à 20cm. Cette situation indique une collision future si aucun des marcheurs n'adapte son mouvement courant. On observe alors que $mpd(t)$ est augmentée durant la phase d'interaction, grâce à des adaptations du mouvement des marcheurs, pour atteindre une valeur finale de 80cm au croisement (t_{cross} , 100%). Ceci permet aux marcheurs de se croiser en évitant toute collision.

Adaptations de la vitesse et l'orientation pour éviter la collision

Enfin, nous nous sommes intéressés à la manière dont la tâche d'évitement de collision, représentée par $mpd(t)$ était régulée individuellement par chacun des marcheurs. Chaque marcheur était identifié par son ordre de passage au croisement (le marcheur qui passe en premier et celui qui passe second). Nous avons alors étudié les stratégies utilisées par chaque marcheur pour éviter la collision future (adaptation de la vitesse et/ou de l'orientation) en terme d'effet sur la distance future de croisement. Dans cette étude nous nous sommes intéressés plus à l'effet des adaptations de mouvement sur la distance de croisement future qu'aux adaptations en elles-mêmes. Pour cela, nous avons calculé les

dérivées partielles de $mpd(t)$ en fonction du type d'adaptation de mouvement réalisé par chacun des marcheurs (en vitesse ou orientation). Ceci permet d'évaluer de combien varie $mpd(t)$ lorsque la vitesse ou l'orientation du marcheur premier ou second au croisement varie. Ce calcul a été effectué de la manière suivante :

$$mpd(t) = f(a, b, \theta_1, s_1, \theta_2, s_2) \quad (2.5)$$

avec θ_1, s_1 et θ_2, s_2 respectivement l'orientation instantanée et la vitesse instantanée du marcheur premier (#1) et second (#2) au croisement et $X = (a, b)$, la position relative du marcheur #2 par rapport à celle du marcheur #1.

Pour chacun de ces 6 paramètres p , leur effet instantané individuel sur $mpd(t)$ est défini de la manière suivante :

$$\epsilon_p = \frac{\partial f}{\partial p} . dp \quad (2.6)$$

L'effet instantané total peut alors se définir de la manière suivante (pour plus de détails, se référer à l'article de Olivier et al. (2013)) :

$$\nabla f = \epsilon_{s_1} + \epsilon_{s_2} + \epsilon_{\theta_1} + \epsilon_{\theta_2} \quad (2.7)$$

En intégrant les effets instantanés au cours du temps, il est possible d'évaluer la contribution cumulée de chaque participant en vitesse ($C\epsilon_{s_1}$ et $C\epsilon_{s_2}$) et en orientation ($C\epsilon_{\theta_1}$ et $C\epsilon_{\theta_2}$) sur les variations de $mpd(t)$:

$$C\epsilon_{s_1} = \int_0^t \frac{\partial f}{\partial s_1} . \frac{\partial s_1}{\partial t} . dt \quad (2.8)$$

$$C\epsilon_{s_2} = \int_0^t \frac{\partial f}{\partial s_2} . \frac{\partial s_2}{\partial t} . dt \quad (2.9)$$

$$C\epsilon_{\theta_1} = \int_0^t \frac{\partial f}{\partial \theta_1} . \frac{\partial \theta_1}{\partial t} . dt \quad (2.10)$$

$$C\epsilon_{\theta_2} = \int_0^t \frac{\partial f}{\partial \theta_2} . \frac{\partial \theta_2}{\partial t} . dt \quad (2.11)$$

L'effet cumulé total des adaptations de mouvement des deux marcheurs sur $mpd(t)$ peut alors s'écrire de la manière suivante :

$$\nabla Cf = C\epsilon_{s_1} + C\epsilon_{s_2} + C\epsilon_{\theta_1} + C\epsilon_{\theta_2} \quad (2.12)$$

On peut enfin déduire les contributions des stratégies de modification de la vitesse ($\%C\epsilon_{s_1}$ et $\%C\epsilon_{s_2}$) et de l'orientation ($\%C\epsilon_{\theta_1}$ et $\%C\epsilon_{\theta_2}$) et les contributions totales de chaque marcheur ($\%C\epsilon_1$ et $\%C\epsilon_2$) en terme de pourcentage de variation de $mpd(t)$:

$$\%C\epsilon_{s_1} = \frac{C\epsilon_{s_1}}{\nabla Cf} \times 100 \quad (2.13)$$

$$\%C\epsilon_{s_2} = \frac{C\epsilon_{s_2}}{\nabla Cf} \times 100 \quad (2.14)$$

$$\%C\epsilon_{\theta_1} = \frac{C\epsilon_{\theta_1}}{\nabla Cf} \times 100 \quad (2.15)$$

$$\%C\epsilon_{\theta_2} = \frac{C\epsilon_{\theta_2}}{\nabla Cf} \times 100 \quad (2.16)$$

$$\%C\epsilon_1 = \frac{C\epsilon_{s_1} + C\epsilon_{\theta_1}}{\nabla Cf} \times 100 \quad (2.17)$$

$$\%C\epsilon_2 = \frac{C\epsilon_{s_2} + C\epsilon_{\theta_2}}{\nabla Cf} \times 100 \quad (2.18)$$

2.3.5 Résultats et Discussion

***mpd(t)*, un descripteur de l'interaction entre deux marcheurs**

Tout d'abord, il est à noter que la tâche d'évitement de collision a été correctement réalisée par l'ensemble des participants puisqu'aucune collision n'a été relevée sur l'ensemble des 420 essais de l'expérience. En moyenne, la phase d'interaction durait 4,1s ($\pm 0,5$). La figure 2.14 illustre alors l'ensemble des courbes d'évolution de la distance future de croisement, $mpd(t)$, durant la phase d'interaction. Nous pouvons remarquer sur cette figure la grande variété des conditions initiales d'interaction entre deux marcheurs durant un croisement à 90° puisque les valeurs mesurées de $mpd(t_{see})$ étaient comprises entre 0 et 3,8m, générant ainsi des situations à plus ou moins fort risque de collision future.

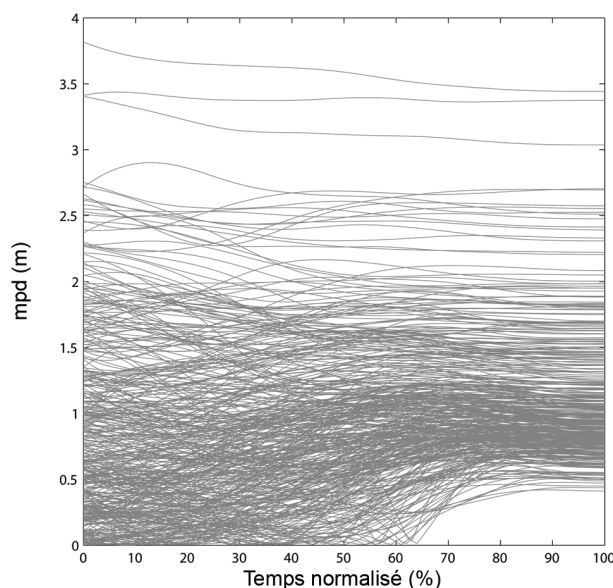


FIGURE 2.14 – Évolution de la mpd durant la phase d'interaction pour les 420 essais de l'expérimentation.

Afin de tenir compte de cette grande variété des conditions initiales, nous avons divisé le jeu de données en 10 groupes de 42 essais ordonnés par valeur croissante de $mpd(t_{see})$. Les courbes moyennes de $mpd(t)$, pour chacun de ces groupes, sont illustrées sur la figure 2.15a. Pour chacune de ces courbes, nous avons comparé les valeurs de $mpd(t_{see})$ avec celles de $mpd(t_{cross})$ (cf. figure 2.15b). Les résultats ont montré que lorsque $mpd(t_{see})$ était inférieure à 1 m (groupes 1–6), les valeurs de $mpd(t_{cross})$ étaient significativement supérieures à celles de $mpd(t_{see})$, témoignant d'une adaptation de mouvement visant à augmenter la distance future de croisement. Lorsque les valeurs de $mpd(t_{see})$ étaient comprises entre 1 et 1,5m (groupes 7–8), il n'y avait pas de différence significative entre les valeurs de $mpd(t_{cross})$ et celles de $mpd(t_{see})$, témoignant d'une absence d'adaptation pour modifier la distance de croisement. Enfin, lorsque les valeurs de $mpd(t_{see})$ étaient supérieures à 1,5m (groupes 9-10), les participants se permettaient même de réduire la distance future de croisement puisque les valeurs de $mpd(t_{cross})$ étaient significativement plus petites que celles de $mpd(t_{see})$.

Ce premier résultat valide notre hypothèse H1, puisqu'une modification de la trajectoire de marche des participants a été observée uniquement si les valeurs de $mpd(t_{see})$ était inférieure à un mètre. Autrement dit, les marcheurs adaptent leur trajectoire de

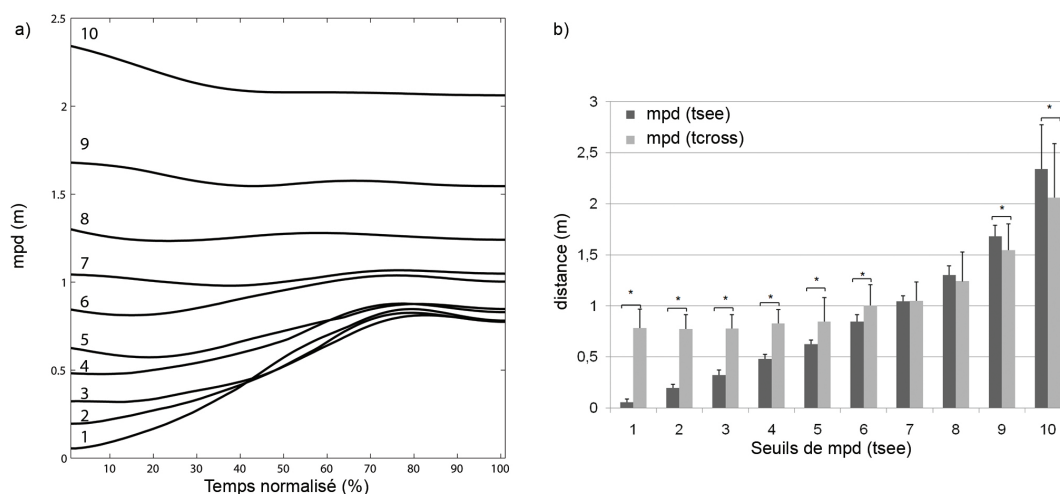


FIGURE 2.15 – a) Évolution moyenne de $mpd(t)$ pour chacun des dix groupes ordonnés par valeur croissante de $mpd(t_{see})$. (b) Valeurs moyennes ($\pm$ SD) de $mpd(t_{see})$ et $mpd(t_{cross})$ pour chacun des dix groupes.

marche uniquement si cela est nécessaire, i.e, la distance future de croisement au début de l'interaction est trop faible. Il semblerait donc que les marcheurs soient capables d'estimer de manière précise leur distance future de croisement dans la mesure où un seuil de risque de collision peut être mis en lien avec la présence ou l'absence d'adaptation de mouvement des marcheurs. Ce résultat peut être mis en lien avec la notion de préservation d'espace personnel durant la locomotion (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005).

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'évolution temporelle des adaptations mises en place par les marcheurs pour éviter la collision en calculant l'évolution moyenne de $mpd(t)$ (cf. figure 2.16a) et sa dérivée temporelle (cf. figure 2.16b), pour les essais dont les valeurs de $mpd(t_{see})$ étaient inférieures à 1m (ce qui représentait un sous-ensemble de 260 essais). Nous avons pu alors décrire 3 phases durant l'interaction : 1) une phase d'observation pendant laquelle les marcheurs ne modifient pas leur trajectoire de marche ($mpd(t)$ est constante), 2) une phase de réaction pendant laquelle les marcheurs modifient leur trajectoire de marche afin d'augmenter la distance future de croisement ($mpd(t)$ augmente), 3) et enfin une phase de régulation pendant laquelle $mpd(t)$ est maintenue à un niveau constant pour atteindre une distance de croisement de 0,84m ($\pm$ 0,19).

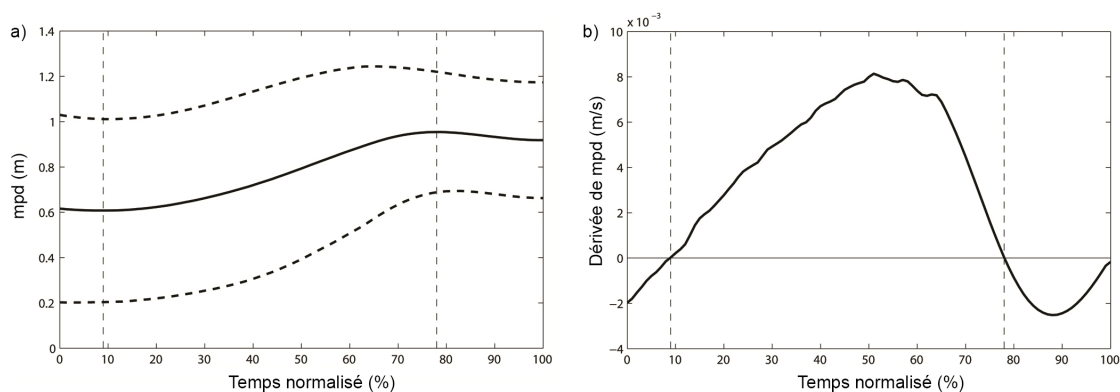


FIGURE 2.16 – a) Évolution moyenne de $mpd(t)$ lorsque $mpd(t_{see})$ est inférieure à 1m et b) dérivée temporelle de cette courbe. L'interaction peut être décrite en 3 phases successives nommées observation, réaction et régulation.

La phase d'observation est courte (0,3s). L'information concernant le risque de collision future semble être disponible rapidement, ce qui est en accord avec l'étude de Gérin-Lajoie et al. (2005) qui ont montré une déviation initiale de la trajectoire de marche un pas après avoir vu le mannequin se déplacer sur une trajectoire menant à une collision future. La phase de réaction est quant à elle la plus longue (3s). Les marcheurs adaptent leur trajectoires respectives afin d'augmenter la distance future de croisement à un seuil acceptable de 0,88m ($\pm 0,21$) garantissant une absence de collision future. Cette adaptation peut être qualifiée par un certain niveau d'optimalité car la distance future de croisement n'est pas exagérément augmentée. Enfin, la phase de régulation débute approximativement 0,8s avant le croisement effectif entre les deux marcheurs. Nous avons interprété l'existence de cette phase comme un indicateur de la présence d'anticipation durant cette interaction. En effet, la tâche d'évitement de collision est résolue avant la fin de l'interaction. Ce comportement n'est pas en accord avec le modèle de Fajen et Warren (2005) mais corrobore les résultats de Gérin-Lajoie et al. (2005) et de Patla et al. (2004). Par ailleurs, contrairement à l'étude de Gérin-Lajoie et al. (2005), nous n'avons pas observé de réajustement à la fin de l'interaction qui permet d'augmenter la distance médio-latérale juste avant le croisement. Nous attribuons cela à la différence de protocole entre nos études : le marcheur ne s'attend pas à quelque adaptation du mannequin puisque ce dernier est passif (i.e., avec une trajectoire linéaire à vitesse constante) alors que face à

une autre marcheur, il peut s'attendre à un partage de l'effort d'évitement de collision avec néanmoins une incertitude quant à ses adaptations. Ceci pourrait expliquer le fait que l'évitement de collision soit résolu 0,8s en avance, durée proche de celle d'une foulée qui correspond selon Patla (1999) à la durée minimale nécessaire pour mettre en place avec succès des stratégies adaptatives du mouvement durant la marche.

L'évitement de collision : une tâche collaborative mais dont les contributions individuelles dépendent de l'ordre de passage au croisement.

Ces premiers résultats ont permis de caractériser l'évitement de collision d'un point de vue global. Intéressons nous à présent aux contributions individuelles de chaque marcheur. Pour rappel, nous nous intéressons aux stratégies mises en place par chacun des marcheurs, non pas de manière absolue (e.g., modifier la direction de la marche de 4° vers la droite ou ralentir de 0,2m/s), mais en terme d'effet sur la distance future de croisement.

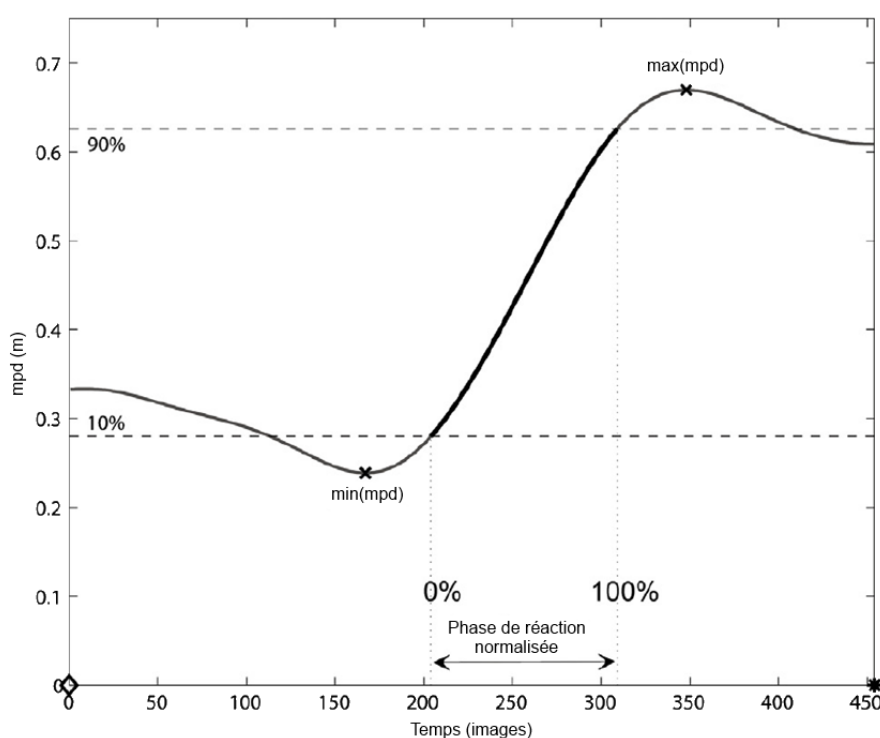


FIGURE 2.17 – Illustration de la fenêtre temporelle (phase de réaction normalisée) utilisée pour évaluer les contributions relatives de chaque marcheur à l'évitement de collision.

En s'appuyant sur les résultats précédents, nous nous sommes focalisés sur l'analyse des stratégies mises en place durant la phase de réaction en considérant la portion centrale

des données pour laquelle 80% de variation de $mpd(t)$ était réalisée (entre 10% et 90% de la variation totale de $mpd(t)$). Ceci est illustré par la figure 2.17. Nous avons réalisé ainsi une nouvelle normalisation temporelle des données. Cette fenêtre temporelle est alors appelée phase de réaction normalisée.

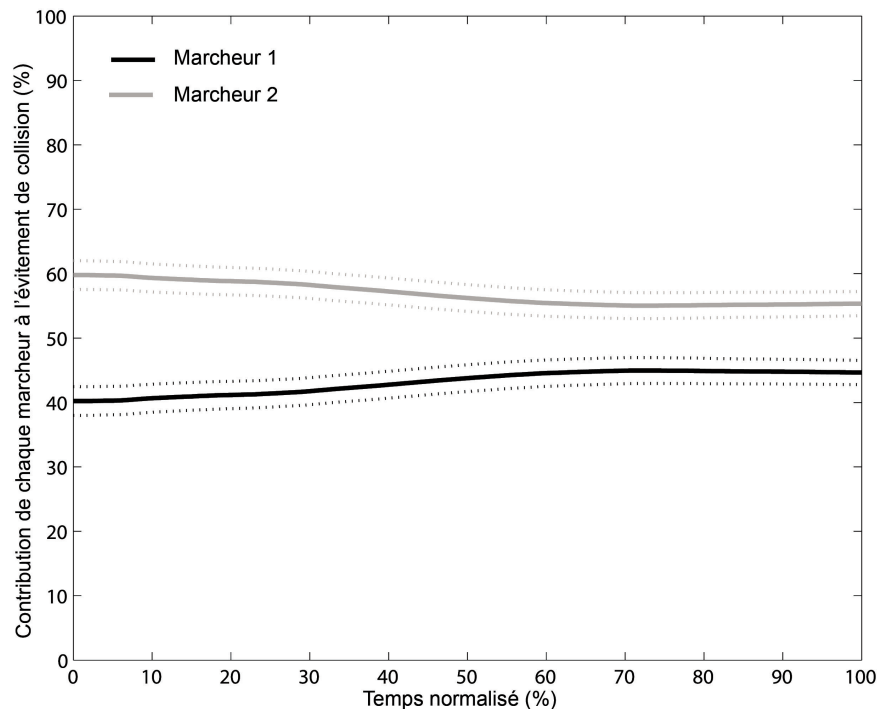


FIGURE 2.18 – Contributions (% , moyenne $\pm$ SEM) de chaque marcheur à l'augmentation des valeurs de mpd durant la phase de réaction normalisée. Alors que les deux marcheurs participent à l'évitement de collision, le marcheur second au croisement contribue de manière plus importante que le participant premier au croisement.

L'analyse des contributions individuelles a tout d'abord révélé que la tâche d'évitement de collision était réalisée de manière conjointe (cf. figure 2.18) : les deux marcheurs adaptent leurs trajectoires de marche de telle sorte que la distance future de croisement augmente évitant ainsi tout risque de collision. Néanmoins, la contribution du marcheur second au croisement ($56,8\% \pm 0,17$) est toujours supérieure à celle du marcheur passant premier ($43,2\% \pm 0,17$). Notons que très peu d'inversions de l'ordre de passage ont été observées durant l'expérience : le marcheur #1 (resp. #2) à t_{see} était aussi le marcheur #1 (resp. #2) à t_{cross} . Ce résultat valide notre hypothèse H2 puisque les contributions

à l'évitement de collision dépendent du rôle dans l'interaction, le marcheur second au croisement contribuant plus que le marcheur passant premier. Comme illustré sur la figure 2.12, nous attribuons ce résultat à l'asymétrie de l'espace personnel (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005). Cette asymétrie dans les contributions pourrait aussi être expliquée par la différence d'entrées visuelles de chaque marcheur : percevoir un marcheur passant devant soi est différent de percevoir un marcheur passant sur son côté ou derrière soi.

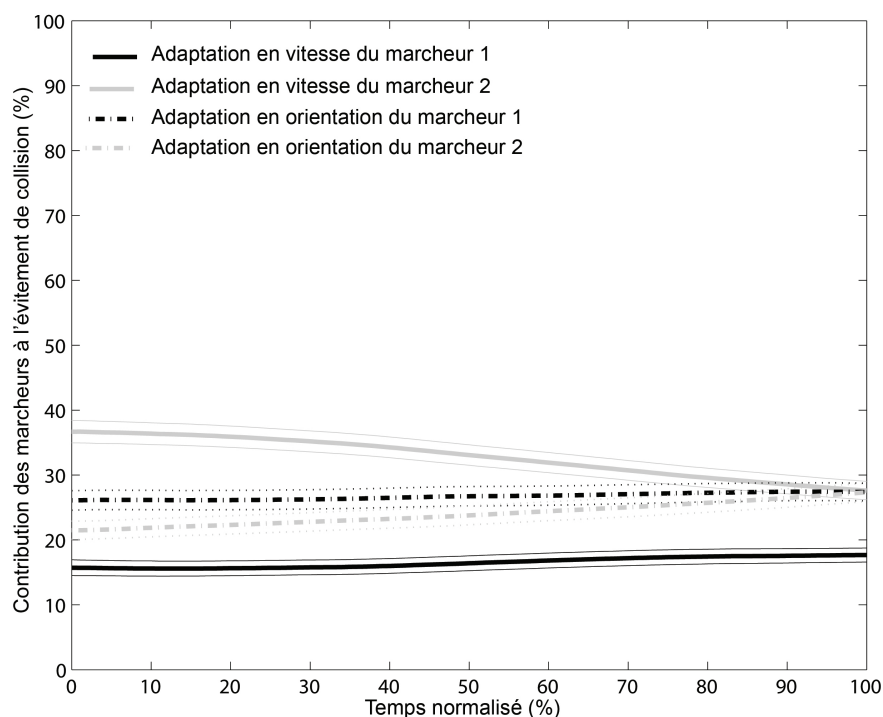


FIGURE 2.19 – Contribution (% , moyenne $\pm$ SEM des stratégies d'adaptation de la vitesse et de l'orientation de chacun des marcheurs pour augmenter $mpd(t)$ durant la phase d'interaction normalisée.

Si on s'intéresse à présent à la nature des adaptations (i.e., modification de la vitesse ou de l'orientation), on remarque que le rôle des marcheurs n'influence pas seulement leur contribution totale dans la tâche d'évitement de collision mais également les stratégies utilisées pour adapter leur mouvement, comme illustré sur la figure 2.19. Durant la première moitié de la phase de réaction normalisée, une adaptation de la vitesse de marche (décélération) est privilégiée par le marcheur #2 (contribution d'environ 35%),

une ré-orientation est réalisée par chacun des marcheurs (25% chacun) et l'adaptation de la vitesse du marcheur #1 (accélération) n'intervient que pour 15% dans l'augmentation de $mpd(t)$. Dans la seconde moitié de la phase de réaction normalisée, chacune des stratégies rend compte de contributions similaires, avec néanmoins l'adaptation de la vitesse du marcheur #1 présentant des valeurs inférieures.

2.3.6 Conclusion

Cette section a permis de présenter le cadre expérimental et les métriques d'analyse ayant bâti les fondements de notre approche sur les interactions entre deux marcheurs. En particulier, nous nous sommes attachés à caractériser la tâche d'évitement de collision en considérant une nouvelle métrique commune aux deux marcheurs : la distance future de croisement mpd . Cette variable apparaît selon nous comme un descripteur intéressant de l'interaction entre deux marcheurs car elle a pour avantage de renseigner sur le risque futur de collision et ses variations permettent de révéler l'évolution temporelle de l'interaction ainsi que les adaptations de mouvement des marcheurs. Au lieu de mesurer directement les adaptations de mouvement, définies comme des déviations du comportement observé en ligne droite (CINELLI et PATLA, 2007, 2008 ; GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005), nous nous sommes intéressés aux effets de ces adaptations sur la distance future de croisement, en d'autres termes leurs conséquences sur la situation finale au moment du croisement. En particulier, nous avons pu montrer que les marcheurs adaptent leur mouvement uniquement si cela est nécessaire puisqu'une augmentation de $mpd(t)$ n'a été observée que si la distance future de croisement était inférieure à 1m. Par ailleurs, il est possible de décrire la tâche d'évitement de collision comme une succession de 3 phases comprenant une phase d'observation, une phase de réaction et une phase de régulation, cette dernière témoignant que la tâche est résolue avant le croisement. La tâche d'évitement de collision est résolue de manière collaborative entre les marcheurs, mais la nature et la quantité d'adaptation varient en fonction du rôle de chaque marcheur, en lien avec son ordre de passage au croisement. En effet, le marcheur qui passe second contribue plus à augmenter la mpd que celui qui passe premier.

Quelques équipes se sont penchées comme nous sur la question des interactions entre marcheurs dans des conditions réelles de croisement à partir des années 2010. La différence majeure avec notre protocole était que les marcheurs étaient en mesure de se voir dès le début de l'interaction et pour certaines d'entre elles, un seul participant volontaire était impliqué, l'autre marcheur étant un confédéré qui n'adaptait pas son mouvement de marche (BASILI et al., 2013 ; HUBER et al., 2014). Les auteurs ont alors montré que le choix du type de stratégies locomotrices mises en place pour éviter la collision dépendrait de la situation (vitesse de marche, angle de croisement) (HUBER et al., 2014 ; KNORR et al., 2016) plutôt que des caractéristiques liées aux individus comme leur sexe ou leur personnalité (KNORR et al., 2016). Le choix de ces stratégies ne serait pas basé sur un critère d'optimalité (BASILI et al., 2013) mais reposerait sur un compromis entre sécurité et énergie. Par ailleurs, il a été montré que l'ordre de passage n'est pas modifié au cours de l'interaction et peut être prédit avec un niveau de confiance à 95%, 2,5m avant le croisement (KNORR et al., 2016).

De nombreuses questions sur la question des interactions restent en suspens : la *mpd* est-elle une variable de contrôle utilisée par les marcheurs pour réguler leur mouvement, ou est-ce seulement un descripteur de l'interaction du point de vue du chercheur ? Comment se définit la notion de risque de collision ? En effet, nous avons raisonné sur un critère de distance future de croisement mais qu'en est-il du temps restant avant la collision dans ce cadre ? Quelle est l'influence des facteurs individuels (sexe, âge, pathologie, état émotionnel, ...) et situationnels (angle de croisement, trajectoire non linéaire, ...) ? Pour répondre à ces questions, nous étions confrontés à un problème expérimental de taille : travailler avec des participants humains dans des tâches d'interaction. La question de la standardisation des conditions expérimentales s'avérait être un réel challenge puisqu'il était complexe de répéter les mêmes conditions pour l'ensemble des participants et de manipuler finement les facteurs d'analyse. Ces points sont pourtant fondamentaux pour limiter la variation non systématique dans les données et mettre en avant des effets statistiques. Mes travaux de recherche se sont alors intéressés à la validité de la réalité virtuelle pour l'étude des interactions entre marcheurs.

2.4 La réalité virtuelle pour l'étude des interactions entre marcheurs

Dans cette section, je vais présenter les travaux que nous avons menés afin de valider l'usage de la réalité virtuelle pour l'étude des interactions entre marcheurs. En particulier, nous avons cherché à évaluer si, lorsqu'on immerge un participant en interaction avec un marcheur virtuel, on observe des comportements conformes à ceux observés dans des conditions réelles. Cette étape est fondamentale avant de pouvoir utiliser les outils offerts par la réalité virtuelle pour concevoir de nouveaux protocoles d'analyse des interactions entre marcheurs. Avant de présenter nos travaux, je vais débiter cette section par quelques éléments de contexte.

2.4.1 Contexte

La réalité virtuelle a été définie comme "un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des dispositifs d'interaction en vue de simuler, dans un environnement virtuel, le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs" (ARNALDI, FUCHS et TISSEAU, 2003). La réalité virtuelle est un outil puissant pour l'étude des interactions sociales qui offre de nouvelles perspectives expérimentales puisqu'elle permet un contrôle expérimental fort tout en préservant une grande fidélité écologique (BLASCOVICH et al., 2002 ; LOOMIS, BLASCOVICH et BEALL, 1999 ; PAN et HAMILTON, 2018), ce qui est un enjeu de taille lorsqu'on considère les interactions entre individus. Par ailleurs, un avantage majeur est qu'il est aisé de manipuler n'importe quelle caractéristique de l'environnement avec lequel un individu interagit et d'en observer les effets sur le comportement de ce dernier. L'intérêt grandissant de la réalité virtuelle dans le contexte des Sciences Sociales peut être mis en évidence par les différentes revues de littérature concernant les bonnes pratiques méthodologiques pour son usage, ses avantages et limites (GELDER, KÄTSYRI et BORST, 2018 ; PAN et HAMILTON, 2018 ; ROSA et BREIDT, 2018 ; VASSER et ARU, 2020 ; YAREMYCH et PERSKY, 2019).

Néanmoins, il est important de noter que la boucle d'interaction entre l'individu et son environnement diffère de celle existant en environnement réel, comme illustré sur la figure 2.20.

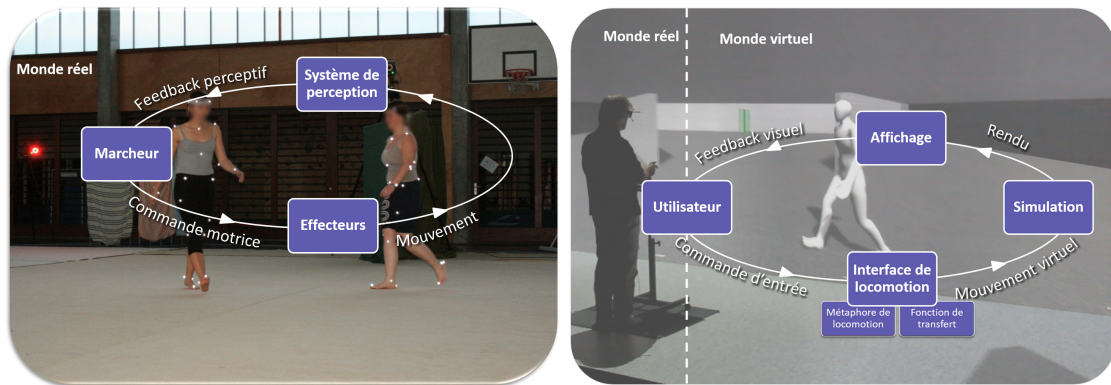


FIGURE 2.20 – Boucle d'interaction en conditions réelles et virtuelles lors d'une interaction entre deux marcheurs réels, ou un utilisateur réel et un marcheur virtuel. Les différences dans la nature des interactions, tant au niveau de la perception que de l'action, met en évidence la nécessité d'une évaluation de la capacité de la réalité virtuelle à générer des comportements conformes à ceux observés en réel si on souhaite utiliser cet outil pour l'étude des interactions entre marcheurs.

En conditions réelles, un marcheur, à travers des commandes motrices aux effecteurs se déplace dans son environnement. En se déplaçant, son système de perception (vision, proprioception, ...) lui fournit des retours sur son mouvement propre et sur l'environnement qui l'entoure. En conditions virtuelles, cette boucle d'interaction s'avère plus complexe car elle implique des aspects matériels. Tout d'abord, l'environnement est perçu à travers un système d'affichage numérique, avec des caractéristiques spécifiques de champ de vision, de point de vue ou de contraste, pouvant introduire des biais de perception comme une compression des distances (LOOMIS, KNAPP et al., 2003 ; RENNER, VELICHKOVSKY et HELMERT, 2013 ; WILLEMSSEN et al., 2004), ou affecter la perception de la vitesse (BANTON et al., 2005). Un second point concerne le mouvement de l'utilisateur dans le monde virtuel. L'utilisateur peut marcher physiquement dans le monde virtuel, du fait que la salle immersive soit assez grande, ou qu'il porte un casque de réalité virtuelle avec une zone de capture adaptée. Dans ce cadre, il a été montré que la vitesse de marche est réduite en environnement virtuel (FINK, FOO et WARREN, 2007) ou encore que la marche est plus instable (HOLLMAN et al., 2007).

Bien que la marche soit sans nul doute le mode locomoteur le plus écologique, il est fréquent que le dispositif virtuel n'autorise pas un tel mouvement. Afin que l'utilisateur se déplace dans l'environnement virtuel sur de larges distances, il est alors nécessaire de recourir à l'utilisation d'interfaces de locomotion pour palier aux contraintes physiques de l'environnement dans lequel se déroule l'expérimentation. Ces interfaces de locomotion sont constituées à la fois d'un périphérique (e.g., un joystick) et d'une partie logicielle. Le mouvement d'actionnement du périphérique est différent de la marche réelle, et le mouvement simulé dépend également de la fonction de transfert appliquée. Des biais peuvent alors être introduits dans le mouvement généré. Ces biais doivent alors être connus et contrôlés si on souhaite interpréter correctement les résultats obtenus dans des paradigmes expérimentaux menés dans des mondes virtuels.

Concernant la question des interactions entre marcheurs, de nombreux auteurs se sont intéressés à évaluer la persistance des normes de proxémie dans le cas où un utilisateur interagit avec un humain virtuel. Ainsi, Bailenson et al. (2001) ont mis en place une expérience où des participants, portant un casque de réalité virtuelle, devaient approcher un humain virtuel statique afin de trouver des éléments sur ces vêtements. Les auteurs ont montré que les participants maintenaient toujours une distance seuil entre eux et l'humain virtuel (40cm). Comme démontré en conditions réelles, les auteurs ont aussi montré que les individus maintenaient des distances supérieures si l'humain virtuel était engagé dans un contact continu par le regard. L'orientation de l'humain virtuel avait également une influence puisque les individus maintenaient une plus grande distance s'ils approchaient l'humain virtuel de face plutôt que par l'arrière. D'autres auteurs ont également mis en évidence une influence du sexe et de l'âge dans la régulation de ces normes de proxémie (IACHINI et al., 2016; YEE et al., 2007). Alors que la persistance des normes de proxémie en réalité virtuelle a ainsi été démontrée, peu de travaux ont été réalisés dans une tâche d'évitement de collision entre deux marcheurs. A notre connaissance, lorsque nous avons initié nos recherches sur la validation de l'utilisation de la réalité virtuelle, seules les études de Fink et al. (2007) et Gérin-Lajoie et al. (2008) avaient considéré une tâche d'évitement de collision, cette dernière étant réalisée dans

le cas d'un obstacle statique. Il a alors été mis en avant que les trajectoires générées pour se déplacer vers un but étaient similaires en réel et en virtuel mais que la vitesse de marche et la distance maintenue entre l'obstacle et le marcheur était plus grande (FINK, FOO et WARREN, 2007). Durant cette tâche, les auteurs ont mis en avant que l'espace personnel serait également une variable qui permettrait le contrôle de la navigation en réalité virtuelle. Sa forme elliptique est préservée en réalité virtuelle mais ses dimensions sont légèrement augmentées (GÉRIN-LAJOIE et al., 2008).

Les technologies liées à la réalité virtuelle évoluant à une très grande vitesse, et aucune étude n'ayant à cette période évalué la fidélité de la réalité virtuelle dans une tâche d'évitement de collision entre deux marcheurs, nous avons proposé une série d'expérimentations évaluant différents dispositifs technologiques que nous allons détailler dans les sections suivantes.

2.4.2 Les prémisses de nos études d'évitement de collision avec un humain virtuel

Perception du risque de collision face à un écran d'ordinateur

Mes travaux sur cette thématique ont débuté lors de ma première année de post-doctorat au sein de l'Inria Rennes. Nous avons tout d'abord exploré la question de la fidélité de l'interaction entre un individu et un humain virtuel dans une tâche d'évitement de collision en considérant les aspects perceptifs. En effet, avant de comparer les paramètres cinématiques de l'évitement de collision en réel avec ceux observés en virtuel, il est nécessaire de s'assurer que les individus perçoivent bien la situation de collision future afin de modifier leur mouvement de manière adaptée. Nous avons ainsi développé une première expérience en perception (OLIVIER et al., 2010), utilisant un dispositif très simple dans un paradigme d'occultation temporelle, qui cherchait à évaluer si un observateur était capable de déterminer si une collision allait avoir lieu ainsi que son ordre de passage au croisement. En effet, nous avons détaillé dans la section précédente que la distance future de croisement était liée à la mise en place ou non d'une manœuvre d'évitement de collision et que ces adaptations dépendaient de l'ordre de passage au croisement. Ainsi, le paradigme expérimental est directement inspiré de nos

études présentées dans la section 2.3 en conditions réelles. Les participants étaient assis face à un écran d'ordinateur. Leur mouvement virtuel, affiché d'un point de vue à la première personne, était un mouvement en ligne droite à vitesse constante de 1.3m/s. Dans cet environnement, un humain virtuel marchait sur une trajectoire sécante à 90° à celle de l'observateur comme illustré sur la figure 2.21. Nous faisons varier le risque de collision (distance future de croisement égale à 0, 0.33, 0.66 et 1m) ainsi que l'ordre de passage au croisement. Nous faisons également varier la durée de visualisation de la situation, en coupant la simulation 0.75s, 1.25s ou 2s après que le participant puisse voir l'humain virtuel (*tsee*). Suite à l'arrêt de la simulation, le participant devait répondre aux questions suivantes : Va-t-il y avoir une collision avec l'humain virtuel ? Quel sera votre ordre de passage au croisement ?

Les résultats de cette étude ont tout d'abord montré que les participants, en observant une situation de croisement en face d'un écran d'ordinateur, étaient plus précis dans la détermination de l'ordre de passage que du risque de collision (défini au sens d'une distance future de croisement inférieure à 0.33m, correspondant à l'interpénétration des enveloppes corporelles). Nous avons interprété ce résultat en lien avec la dérivée de l'angle de gisement impliquée dans la détection d'une collision comme suggéré par Cutting et al. (1995). En effet, détecter une collision revient à identifier une valeur seuil de la dérivée de l'angle de gisement alors que déterminer l'ordre de passage revient à identifier le signe de cette dérivée. Il est alors possible que l'identification du signe soit une tâche plus simple dans ces conditions. L'ordre de passage était estimé avec une précision supérieure à 80%, sauf pour le cas où les participants étaient sensés passer second avec une distance de croisement de 0.33m où le taux de succès était de 60%. En ce qui concerne l'estimation du risque de collision, plus que la précision de la détection du risque, qui était déterminée par notre seuil de 0.33m (et qui peut être discutable selon la manière dont on définit le risque de collision, i.e., au sens de la collision des enveloppes ou incluant une distance sociale), il est intéressant de noter que les participants ont jugé comme situation de collision future les situations allant de 0.33m derrière les participants à 0.66m devant. De ces résultats, deux hypothèses peuvent être formulées : l'espace personnel est plus grand devant que derrière, ou alors les participants perçoivent mal leur

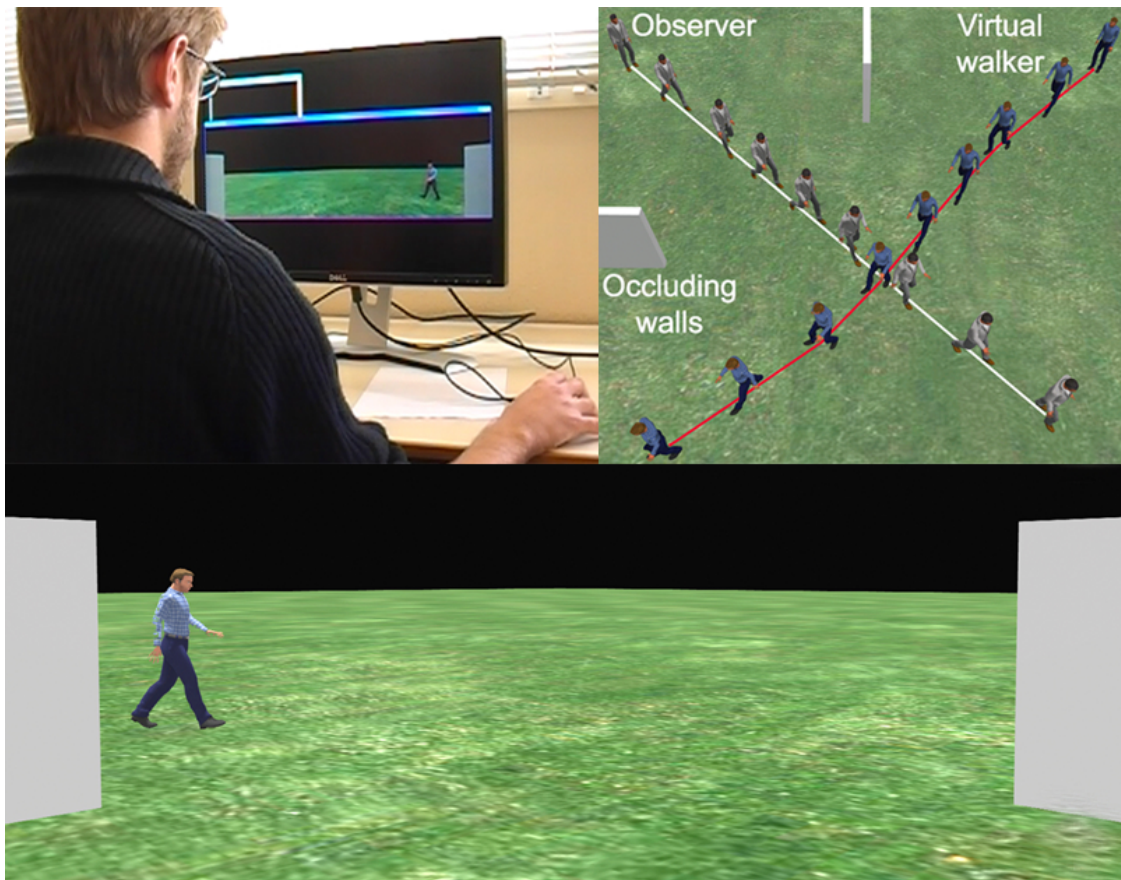


FIGURE 2.21 – Étude en perception de la situation d’interaction entre deux marcheurs : les participants, assis devant un écran d’ordinateur, devaient observer le mouvement d’un marcheur virtuel sur une trajectoire sécante à 90° , avec un point de vue à la première personne. L’animation était coupée 0,75, 1 ou 2s après que les participants puissent voir le marcheur virtuel. Ils devaient alors indiquer si une collision allait avoir lieu, et leur ordre de passage au croisement.

position dans l’environnement virtuel, avec un léger décalage vers l’avant, ce qui pourrait expliquer les erreurs commises dans l’évaluation de l’ordre de passage lorsque le sujet est sensé passer deuxième avec 0.33m de retard et estime dans une part importante qu’il va passer premier. Nous reviendrons sur ces questions dans la sous-section suivante où nous avons observé des résultats similaires dans une autre expérience en salle immersive. Notons enfin que les temps d’occultation n’avaient qu’un très faible effet, suggérant que les indices visuels nécessaires pour prendre une décision étaient rapidement disponibles dans l’interaction. Ces premiers résultats étaient ainsi encourageants pour continuer nos efforts d’évaluation de la réalité virtuelle pour l’étude des interactions entre marcheurs.

Évitement de collision face à un obstacle statique en salle immersive

FIGURE 2.22 – Tâche d'évitement de collision avec un obstacle statique anthropomorphique ou inanimé en conditions réelles et virtuelles (ARGELAGUET SANZ et al., 2015)

Nous avons mené une seconde étude de la tâche d'évitement de collision dans un environnement virtuel, en considérant le cas où un participant marchait physiquement dans une grande salle immersive et devait éviter un obstacle statique disposé sur son chemin (ARGELAGUET SANZ et al., 2015). L'originalité consistait à considérer cette tâche d'évitement de collision dans une salle immersive, contrairement aux études précédentes réalisées avec un casque de réalité virtuelle où la représentation du corps de l'utilisateur n'était pas prise en compte. La salle immersive permet non seulement aux participants de marcher mais également de voir leur corps, sans limitation du champ de vision. Notre objectif était ainsi d'étudier l'effet d'une salle immersive sur la cinématique de l'évitement de collision mais également l'effet de la représentation de l'obstacle. Nous avons ainsi développé une expérience où les participants devaient éviter un obstacle anthropomorphique (un autre humain) ou inanimé (une boîte en carton de mêmes dimensions), en conditions réelles et virtuelles, comme illustré sur la figure 2.22. Nous avons par ailleurs manipulé l'orientation de l'obstacle (face, dos, profil) puisqu'il avait été montré qu'un individu maintenait une plus grande distance avec un humain virtuel s'il l'approchait par devant que par derrière (BAILENSEN et al., 2003).

En comparant les conditions virtuelles et réelles, nous avons pu démontrer les mêmes tendances que les études précédentes réalisées avec des casques de réalité virtuelle (FINK, FOO et WARREN, 2007 ; GÉRIN-LAJOIE et al., 2008) : la vitesse de marche était plus lente

en réalité virtuelle et la distance de croisement était plus élevée en réel. Les participants avaient par ailleurs rapporté dans des questionnaires être plus prudents face aux obstacles virtuels. Bien que des comparaisons quantitatives avec les études passées utilisant un casque de réalité virtuelle sont difficiles, il est intéressant de noter que nous avons obtenu des différences plus faibles entre les conditions réelles et virtuelles. Par exemple, dans l'étude de Fink et al. (2007), la différence entre la vitesse de marche en réel et en virtuel était de 0.13m/s, contre 0.04m/s dans notre étude. Il semblerait alors que les grands environnements virtuels immersifs, autorisant la visualisation de son propre corps et un large champ de vision, induisent moins de biais que les casques de réalité virtuelle, pour lesquels à cette période le corps n'était pas représenté et le champ de vision était limité. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour approfondir cette affirmation. En ce qui concerne la nature de l'obstacle (humain vs. boîte en carton), la distance de croisement était supérieure pour des obstacles anthropomorphiques, la vitesse de marche n'étant pas affectée. Les participants préservaient ainsi une plus grande distance lorsque l'obstacle était anthropomorphique par rapport à un obstacle inanimé, et ceci même en réalité virtuelle. Pour ce qui est de l'orientation de l'obstacle, et notamment le cas de

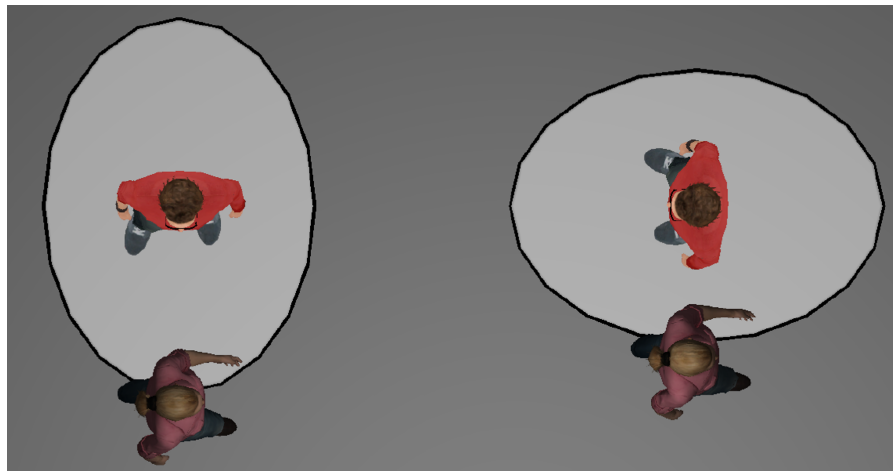


FIGURE 2.23 – La prise en compte de l'espace personnel de l'obstacle anthropomorphique (ici le personnage en rouge), qui serait plus grand sur l'axe antéro-postérieur, permet d'expliquer l'effet de l'orientation de l'obstacle sur la distance de croisement maintenue par le marcheur (ARGELAGUET SANZ et al., 2015)

l'humain qui nous intéresse le plus, la distance de croisement était supérieure lorsque le

participant passait devant (0.7m) ou derrière (0.66m) l'humain virtuel en comparaison à la condition de profil (0.58m) (en réel et en virtuel). Ceci peut être mis en relation avec la forme elliptique de l'espace personnel, dont la dimension antéro-postérieure est plus grande que celle médio-latérale (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005). Lorsque le participant passe devant ou derrière l'humain virtuel, l'évitement de collision consiste à se déplacer pour éviter d'envahir cette distance antéro-postérieure comme illustré sur la figure 2.23, ce qui peut expliquer une distance de croisement plus grande dans ces conditions. Cela suggère que même dans conditions virtuelles, les utilisateurs considèrent l'espace personnel de l'obstacle anthropomorphique dans la tâche d'évitement de collision.

Malgré quelques faibles différences quantitatives, cette étude nous a permis de mettre en avant des comportements très similaires entre des conditions réelles et virtuelles pour réaliser une tâche d'évitement de collision avec un obstacle statique durant la marche. En complément avec les études qui avaient été publiées en utilisant un casque de réalité virtuelle (FINK, FOO et WARREN, 2007 ; GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005) ces résultats dans un grand environnement immersif ouvraient alors de nouvelles perspectives quant à l'usage de la réalité virtuelle pour l'étude des interactions entre marcheurs.

2.4.3 Effet des interfaces de locomotion sur la tâche d'évitement de collision entre deux marcheurs dans une salle immersive

Présentation générale

Après avoir présenté nos premiers efforts menés dans l'évaluation de la réalité virtuelle pour l'étude des interactions entre marcheurs, nous avons poursuivi l'analyse des possibilités offertes par les salles immersives en explorant cette fois-ci l'influence de différentes interfaces de locomotion (OLIVIER et al., 2014, 2018). Cette analyse a été réalisée en particulier dans le cadre de la thèse de Julien Bruneau et du projet ANR Percolation. En effet, bien que notre salle immersive nous permette de marcher sur une distance proche de 10m, il est nécessaire de recourir à des interfaces de locomotion pour les cas d'application où le participant doit naviguer sur de grandes distances. L'objectif majeur était ainsi d'évaluer si les interactions entre deux marcheurs dans une tâche d'évitement de collision étaient préservées dans une salle immersive lorsqu'un individu se déplaçait dans le monde virtuel, non plus en marchant, mais en utilisant une interface de locomotion.

Pour cela, nous avons reproduit le dispositif expérimental utilisé dans nos études de croisement entre deux piétons en environnement réel (cf. figure 2.24a) en considérant une tâche d'évitement de collision à 90° entre un participant et un marcheur virtuel. Les expérimentations se sont déroulées dans une salle immersive de 10m de longueur, 3m de hauteur et 3m de largeur composée de 4 écrans. L'environnement virtuel avait les mêmes caractéristiques que celui décrit dans la section 2.3, tant sur ses dimensions (15×15m) que sur la présence de panneaux occultants, permettant de contrôler le moment à partir duquel le participant est en mesure de voir le marcheur virtuel. Le mouvement du marcheur virtuel était un mouvement en ligne droite à vitesse constante afin de standardiser au maximum les conditions entre les participants et ne mesurer que les adaptations dues à la contribution de ces derniers. Le marcheur virtuel ne réagissait pas à la présence de l'utilisateur. Enfin, nous avons choisi de représenter l'humain virtuel sous une forme très neutre (une silhouette blanche), afin d'éviter l'influence de facteur comme le sexe ou le contact visuel par le regard dans l'interaction.

Nous avons alors mis en place deux expérimentations, impliquant 15 participants (4 femmes, 11 hommes), âgés de 27.2 ans (± 7.6). La première expérimentation était une expérience en perception, afin d'évaluer la capacité des utilisateurs à estimer de manière correcte les conditions de l'interaction en terme de risque futur de collision et d'ordre de passage au croisement dans une salle immersive. Dans la seconde expérimentation, nous cherchions à évaluer la manière dont les participants évitaient une collision avec un marcheur virtuel avec différentes interfaces de locomotion. Nous avons formulé deux hypothèses allant dans le sens que l'évitement de collision en réalité virtuelle a des propriétés similaires à celles en conditions réelles :

- H1 : Un utilisateur est capable d'estimer de manière précise le risque de collision avec le marcheur virtuel. En conditions réelles, nous avons montré que des adaptations de mouvement, traduites par une augmentation de la distance future de croisement (mpd), n'étaient observées que s'il existait un risque futur de collision ($mpd(t_{see}) < 1m$) et que l'ordre de passage avait un rôle important dans l'interaction. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons évalué la capacité des participants à percevoir les conditions futures de l'interaction dans la première expérimentation, et nous avons analysé l'évolution de mpd durant la seconde afin de s'assurer que mpd était augmentée.
- H2 : La tâche d'évitement de collision en réalité virtuelle conserve une structure temporelle similaire à celle observée en réel. Pour vérifier cette hypothèse, nous nous sommes intéressés à l'évolution de mpd durant la seconde expérimentation. En particulier, nous avons cherché à vérifier si l'évolution de mpd pouvait être décrite selon les phases d'observation, de réaction et de régulation, témoignant d'une préservation du comportement d'évitement de collision en virtuel.

Détaillons à présent les deux études proposées ainsi que les résultats principaux.

Étude en perception

Pour la première étude en perception, nous avons développé un paradigme d'occlusion temporelle où les participants, debout dans la salle immersive étaient déplacés

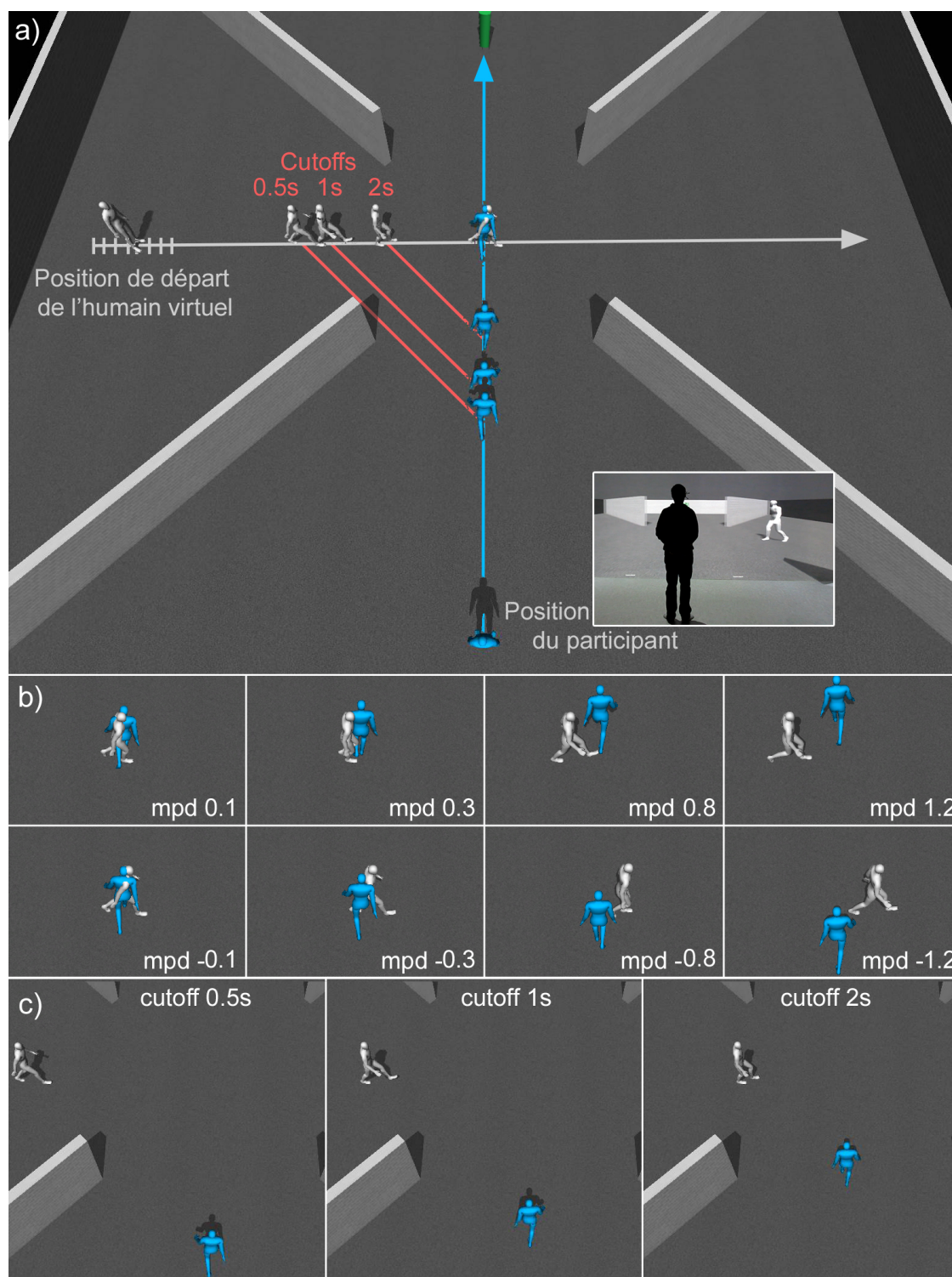


FIGURE 2.24 – a) Afin d'évaluer la fidélité des interactions entre marcheurs dans une salle immersive, nous avons développé 2 expériences dans un paradigme de croisement à 90° entre un utilisateur et un humain virtuel. b) Illustration des conditions expérimentales considérées en terme de risque de collision et d'ordre de passage. c) Exemple des différents instants de coupure considérés pour l'étude en perception.

de manière passive dans l'environnement virtuel. Un marcheur virtuel arrivait alors sur leur droite ou leur gauche selon une trajectoire sécante. Les positions de départ de l'humain virtuel étaient manipulées de telle sorte à faire varier à t_{see} , c'est-à-dire quand le participant est en mesure de voir l'humain virtuel après les panneaux occultants, le risque de collision en terme de distance future de croisement ($mpd(t_{see})$ égale à 0.1, 0.3, 0.8 et 1.2m) et d'ordre de passage ($mpd(t_{see})$ positive (négative) si le participant est prédit comme premier (second) au croisement) (cf. figure 2.24b). Nous n'avons pas choisi de valeur de mpd autour de 0.5m car une ambiguïté peut exister entre la notion de contact entre enveloppes corporelles et le besoin de réaliser une manœuvre d'évitement pour maintenir une distance de confort 0.5s, 1s ou 2s après t_{see} (cf. figure 2.24c), un écran noir apparaissait et les participants devaient alors répondre à deux questions : "Allez-vous entrer en collision avec le marcheur virtuel ?" "Passerez-vous premier ou second ?". Pour chacune de ces questions, les participants devaient noter leur niveau de confiance sur une échelle de Likert (1 : pas du tout confiant à 7 : très confiant). Après 6 essais de familiarisation, les participants ont réalisé chacun 192 essais (3 instants de coupure $\times$ 8 mpd $\times$ 2 côtés (l'humain virtuel pouvant arriver de la droite ou de la gauche) $\times$ 2 répétitions).

La figure 2.25 présente les résultats de l'étude en perception en montrant l'exactitude des réponses des participants concernant le risque futur de collision ainsi que l'ordre futur de passage au croisement en fonction du temps de coupure de la simulation. Les résultats ont montré que l'estimation du risque futur de collision ainsi que de l'ordre de passage était réalisée avec un niveau d'exactitude élevé, témoignant d'une bonne estimation des conditions futures de l'interaction dans la salle immersive. Pour apporter de la nuance à ces résultats, on peut noter que l'exactitude de l'estimation du risque de collision augmentait lorsque les participants avaient plus de temps pour observer la situation (temps de coupure de 2s) et l'augmentation du temps d'observation augmentait le niveau de confiance des participants dans les réponses données. Soulignons deux exceptions concernant l'exactitude de l'estimation du risque de collision lorsque $mpd(t_{see})$ était égale à -0.8m et 0.3m. Ces conditions correspondent à des situations où la distance future

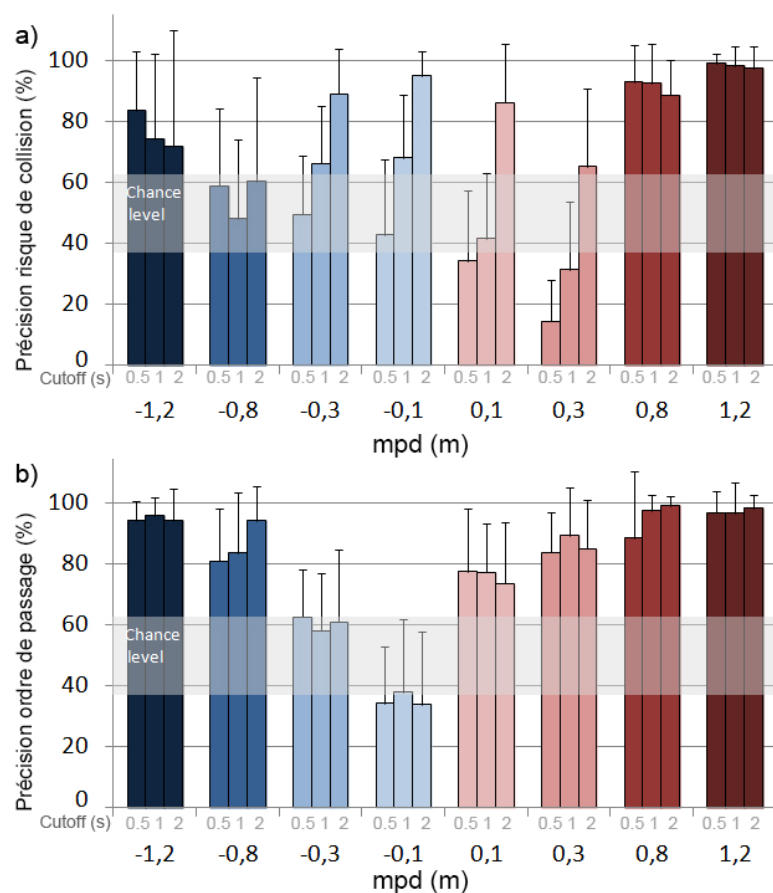


FIGURE 2.25 – Pourcentage de bonnes réponses des participants (moyenne $\pm$ SD) concernant le risque futur de collision (a) et l'ordre de passage au croisement (b) en fonction du temps de coupure de la simulation, dans une situation de croisement avec un marcheur virtuel dans une salle immersive.

de croisement est proche d'une distance de contact. Il n'apparaît donc pas surprenant de prime abord d'observer des mauvaises réponses à proximité de ces valeurs, les participants fournissant des réponses de type faux positif lorsqu'ils étaient seconds au croisement avec une distance de croisement de 0.8m et de type faux négatif lorsqu'ils étaient premiers au croisement avec une distance de 0.3m. Cependant, nous n'avons pas observé de symétrie dans ces mauvaises réponses selon que les participants étaient premiers ou seconds au croisement (i.e., 0.3 vs -0.3 vs 0.8 vs -0.8m). Notre interprétation, qui fait écho au résultat trouvé dans l'étude en perception face à un écran d'ordinateur (OLIVIER et al., 2010), est que les participants ont une perception biaisée de leur corps dans l'espace, comme s'ils se situaient dans l'espace virtuel devant leur enveloppe réelle. Ceci expliquerait

cette asymétrie dans la perception du risque de collision et également les mauvaises réponses concernant l'ordre de passage perçu pour la condition $mpd(t_{see})=-0.1m$, où les participants, sensés passer seconds au croisement estiment en majorité passer premiers. Cette interprétation est corroborée par des remarques de participants qui exprimaient par exemple avoir du mal à se situer dans l'environnement virtuel, ou à estimer le volume occupé par leur corps, qui rendait difficile la réponse à la question sur la collision future. Nous pouvons ainsi valider l'hypothèse 1 puisque en moyenne les participants estimaient de manière correcte les conditions futures de l'interaction. Néanmoins il semblerait que l'estimation correcte de la situation nécessite un délai plus élevé qu'en réel (nous avons pu observer une phase de réaction survenant 0.5s après t_{see} (OLIVIER et al., 2012)) et que la position du participant dans l'environnement virtuel soit perçue avec un décalage.

Évitement de collision selon différentes interfaces de locomotion

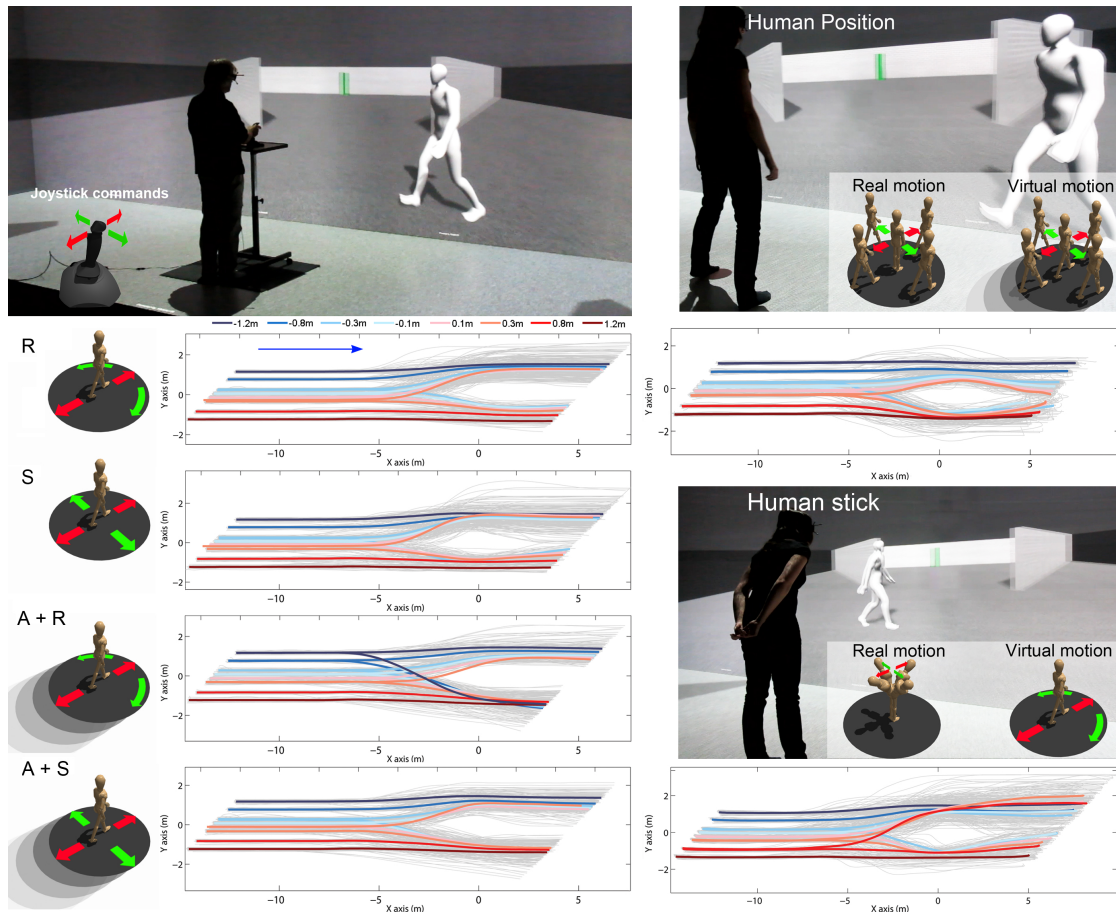


FIGURE 2.26 – Gauche : Un participant interagit avec un marcheur virtuel en utilisant une métaphore de locomotion basée joystick. Nous avons considéré 4 fonctions de transfert. Droite : Une participante interagit avec un humain virtuel en utilisant une métaphore de locomotion basée sur le mouvement du corps entier. Le principe général de ces différentes interfaces de locomotion et les trajectoires résultantes relatives par rapport au marcheur virtuel sont illustrées.

Cette première étude en perception nous ayant fourni des résultats satisfaisants sur l'habileté des participants à percevoir les conditions de l'interaction, nous avons développé une seconde expérimentation dans laquelle les participants devaient rejoindre une cible verte placée 15m devant eux dans l'environnement virtuel en utilisant différentes interfaces de locomotion tout en évitant d'entrer en collision avec l'humain virtuel. Il était complexe de proposer une évaluation exhaustive de l'ensemble des interfaces de locomotion existantes. Nous avons alors évalué 6 interfaces de locomotion qui reposaient soit sur l'utilisation d'un joystick, soit sur une métaphore de locomotion impliquant le

corps entier. Ces interfaces sont illustrées sur la figure 2.26. Le choix du joystick a été motivé par le fait que cette métaphore est largement utilisée dans la littérature et que nos travaux passés avaient montré qu'il permettait de générer des trajectoires dirigées vers un but réalistes, en comparaison avec des données de marche réelles (CIRIO et al., 2013). Pour le joystick, nous avons choisi de tester 4 fonctions de transfert, qui correspondent à la manière dont on traduit les actions de la main du participant sur le joystick en terme de mouvement dans le monde virtuel. Les 4 fonctions étaient les suivantes :

- **R** (Rotation) L'axe longitudinal du joystick contrôle la vitesse s . La vitesse est limitée à $1.4m.s^{-1}$. L'axe latéral du joystick contrôle la vitesse angulaire $\dot{\theta}$ (délimitée entre $[-25, 25]deg.s^{-1}$) :

$$(s, \dot{\theta})_{virt} = (1.4, 25).(x, y)_{joy} \quad (2.19)$$

où x et y correspondent respectivement à l'axe longitudinal et latéral du joystick ($x, y \in [-1, 1]$).

- **S** (Side motion) contrairement à la fonction de transfert **R**, l'orientation est fixée et l'axe latéral contrôle la vitesse latérale s_l du mouvement :

$$(s, s_l)_{virt} = (1.4, 1).(x, y)_{joy} \quad (2.20)$$

- **A+R** (Automatic forward + Rotation) et **A+S** (Automatic forward + Side motion) combinent les fonctions de transfert **R** and **S** à un mouvement automatique vers l'avant fixé à $1.4m.s^{-1}$. Cela signifie que les participants agissent sur le joystick seulement pour réaliser des adaptations de leur trajectoire en étant déplacés automatiquement vers leur but à vitesse de confort.

$$\mathbf{A} + \mathbf{R} : (s, \dot{\theta})_{virt} = (0.6, 25).(x, y)_{joy} + (1.4, 0) \quad (2.21)$$

$$\mathbf{A} + \mathbf{S} : (s_t, s_l)_{virt} = (0.6, 1).(x, y)_{joy} + (1.4, 0) \quad (2.22)$$

Nous avons choisi ces quatre fonctions de transfert pour les raisons suivantes : **R** et **S** correspondent à deux manières de contrôler l'orientation de la trajectoire. En ajoutant la composante de mouvement automatique, cela nous permet de comparer deux manières de contrôler la vitesse.

Nous avons par ailleurs considéré deux autres métaphores de locomotion nécessitant des mouvements physiques du participant impliquant le corps entier. En effet, le joystick ne requiert qu'un mouvement de la main, qui peut ne pas s'avérer représentatif de la dynamique du mouvement de marche impliquée durant l'interaction. La première, appelée **HP** (Human Position), se base sur un mouvement automatique vers l'avant combiné avec des translations dépendant des mouvements additionnels du corps du participant :

$$(x, y)_{virtual} = (1.4t, 0) + (x, y)_{reel} \quad (2.23)$$

avec t le temps et $(x, y)_{reel}$ la position du participant relativement à sa position initiale.

La seconde métaphore appelée **HS** (Human-Stick). Les participants se déplacent dans l'environnement virtuel en se penchant dans la direction désirée de mouvement.

$$(s, s_l) = (k_x, k_y) \cdot (x, y)_{tete} \quad (2.24)$$

avec s la vitesse virtuelle sur l'axe longitudinal, s_l la vitesse virtuelle latérale, et $(x, y)_{tete}$ la position de la tête (décalage par rapport à la position de repos). k_x et k_y sont des gains calibrés pour chaque participant durant une phase de familiarisation de telle sorte qu'ils se sentent à l'aise pour utiliser cette technique.

Nous avons mis en place un design expérimental à mesures répétées où chaque participant réalisait la tâche d'évitement de collision en se déplaçant au moyen des 6 interfaces de locomotion (Joystick avec fonction de transfert R, S, A+R et A+S et métaphore corps complet HS et HP). Les participants n'avaient pas la possibilité de modifier leur mouvement dans l'environnement virtuel avant d'être en mesure de voir l'humain virtuel afin de standardiser les conditions initiales de l'interaction pour tous les participants. Ainsi, à t_{see} , tous les participants se déplaçaient en ligne droite en direction du but à atteindre, à une vitesse constante de 1.4m/s. Les participants ont testé ces interfaces par bloc et l'ordre des interfaces a été randomisé. Les conditions d'interactions avec l'humain virtuel étaient les mêmes que dans l'étude en perception. Ainsi, après une phase de familiarisation pour chaque interface dans un environnement dédié (slalom entre des plots), les participants réalisaient 32 essais par bloc (8 valeurs de $mpd(t_{see}) \times 2$ côtés $\times 2$ répétitions). A la fin de chaque bloc, les participants remplissaient un

questionnaire, adapté du questionnaire USE (LUND, 2001), afin d'obtenir des retours sur des critères de maniabilité, d'efficacité, d'apprentissage et de satisfaction quant à l'utilisation de chaque interface.

La figure 2.26 illustre les trajectoires relatives à la position du marcheur virtuel réalisées par l'ensemble des participants pour chaque interface de locomotion. En analysant les trajectoires des participants et du marcheur virtuel, nous avons tout d'abord étudié la capacité des participants à réaliser avec succès la tâche d'évitement de collision. Pour cela, nous avons dénombré les essais pour chaque participant où une collision a été détectée. Les résultats, illustrés sur la figure 2.27, ont montré un effet de l'interface de locomotion avec un nombre plus important de collisions pour l'interface **HP**, les autres interfaces présentant un nombre très faible de collisions. **HP** semble donc être un mauvais candidat pour reproduire le comportement réel d'évitement de collision. La combinaison entre un déplacement réel et un mouvement automatique a rendu probablement complexe l'estimation du mouvement propre et du mouvement relatif du marcheur virtuel.

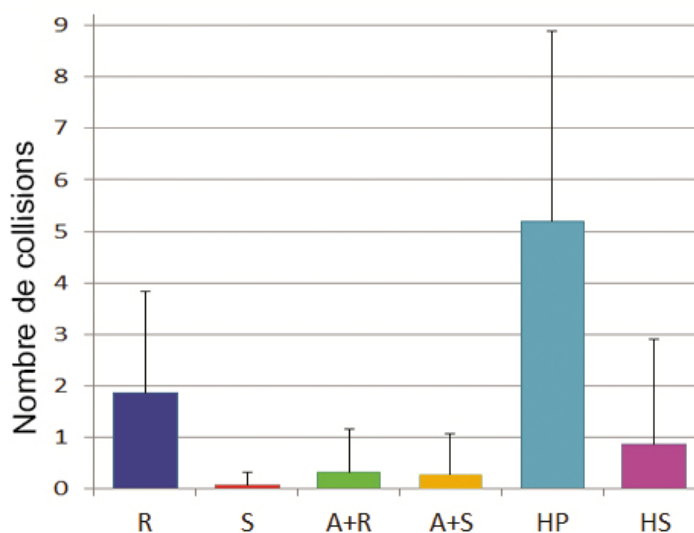


FIGURE 2.27 – Nombre moyen de collision ($\pm$ SD) avec le marcheur virtuel par participant (32 essais par participant) selon l'interface de locomotion.

La figure 2.28 illustre, pour chaque interface de locomotion et l'ensemble des conditions initiales de *mpd*, l'évolution moyenne de *mpd* durant la période d'interaction, définie de la même manière que dans nos études en conditions réelles (entre *tsee* et

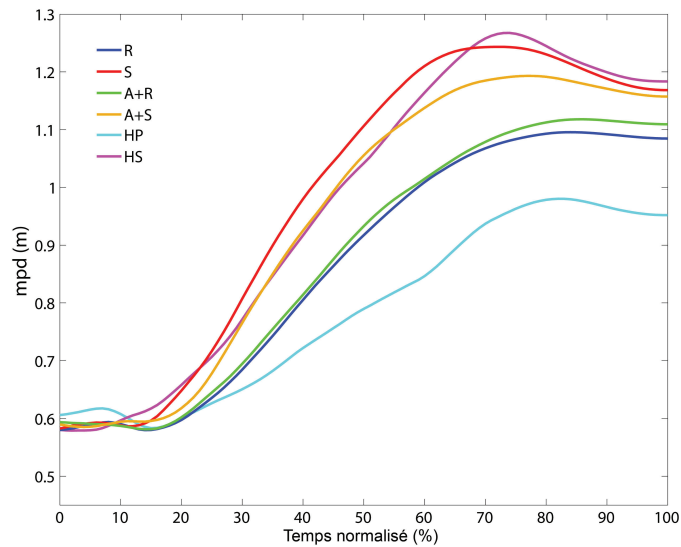


FIGURE 2.28 – Évolution moyenne de mpd durant la phase d'interaction selon l'interface de locomotion. Pour chaque interface, on observe une augmentation de mpd entre le moment où le participant peut voir le marcheur virtuel (0%) et le moment où il le croise (100%).

$tcross$). On peut tout d'abord observer pour chacune des interfaces une augmentation des valeurs de mpd durant cette période d'interaction. Une analyse de la différence entre $mpd(tsee)$ et $mpd(tcross)$ pour chacune des conditions de mpd et chaque interface de locomotion confirme cette observation. Cela signifie que les participants ont adapté leur trajectoire pour éviter la collision avec l'humain virtuel afin de leur laisser suffisamment d'espace au moment du croisement. Les adaptations réalisées étaient donc efficaces pour éviter la collision, ce qui appuie notre hypothèse H1. Il faut néanmoins noter qu'en réel, nous avons montré que des adaptations étaient réalisées pour des valeurs de $mpd(tsee)$ inférieures à 1m (OLIVIER et al., 2012). Dans cette expérience, nous avons observé des adaptations lors des conditions de $mpd(tsee)$ égales à 1.2m. La distance finale de croisement était par ailleurs supérieure à celle observée en conditions réelles (0.84m) et était influencée par l'interface de locomotion avec une distance de croisement plus faible pour **HP**. Ainsi, en comparaison avec des situations réelles, les participants adaptent leur locomotion pour des risques plus faibles de collision (une absence d'adaptation n'aurait pas entraîné de collision avec le marcheur virtuel) et réalisent des adaptations de mouvement plus importantes résultant en des distances de

croisement plus grandes. Cette adaptation excessive pourrait être la conséquence de la compression des distances, observées en environnement virtuel (LOOMIS, KNAPP et al., 2003 ; RENNER, VELICHKOVSKY et HELMERT, 2013 ; WILLEMSSEN et al., 2004), et est en accord avec les résultats d'études précédentes concernant l'évitement de collision avec un obstacle fixe avec un casque de réalité virtuelle (FINK, FOO et WARREN, 2007 ; GÉRIN-LAJOIE et al., 2008), ou dans une salle immersive (ARGELAGUET SANZ et al., 2015).

Intéressons nous à présent à la séquence temporelle de l'évolution de *mpd* durant l'interaction. Pour cela, nous avons considéré la dérivée de *mpd* et avons comparé les valeurs de *mpd* encadrant les changements de signe de cette dérivée. Nous pouvons alors décrire des phases dans l'évolution de *mpd* pour lesquelles *mpd* est soit constante, augmente ou diminue. La figure 2.29 illustre ces évolutions, en comparaison avec celles observées en réel. Un premier résultat intéressant est que pour l'ensemble des interfaces de locomotion considérées dans cette étude, nous avons observé la présence de la phase de régulation décrite dans les données réelles et témoignant de l'existence d'ajustements locomoteurs anticipateurs. L'augmentation de *mpd* (en rouge sur la figure 2.29) est terminée avant le croisement. Aussi, si on s'intéresse à la totalité de l'interaction, la structure temporelle décrite en réel (observation (vert), réaction (rouge) et régulation (bleu)) est strictement préservée pour les interfaces Joystick **A+R** et **HS**. Ce résultat valide notre seconde hypothèse concernant la capacité de la réalité virtuelle à préserver, sous certaine conditions ici, la structure temporelle des adaptations mises en place lors de l'interaction entre deux marcheurs.

Enfin, nous nous sommes intéressés au retour subjectif des participants quant à leur expérience d'utilisation de chacune des interfaces de locomotion. Les résultats du questionnaire sont illustrés sur la figure 2.30. Alors que les résultats ne montrent pas d'effet de l'interface sur les critères d'efficacité, l'interface **HS** a reçu des notations plus faibles sur les critères d'apprentissage, de maniabilité et de satisfaction. En particulier, des retours additionnels des participants ont mis en évidence la sollicitation physique plus importante de cette interface, qu'ils qualifiaient de plus fatigante.

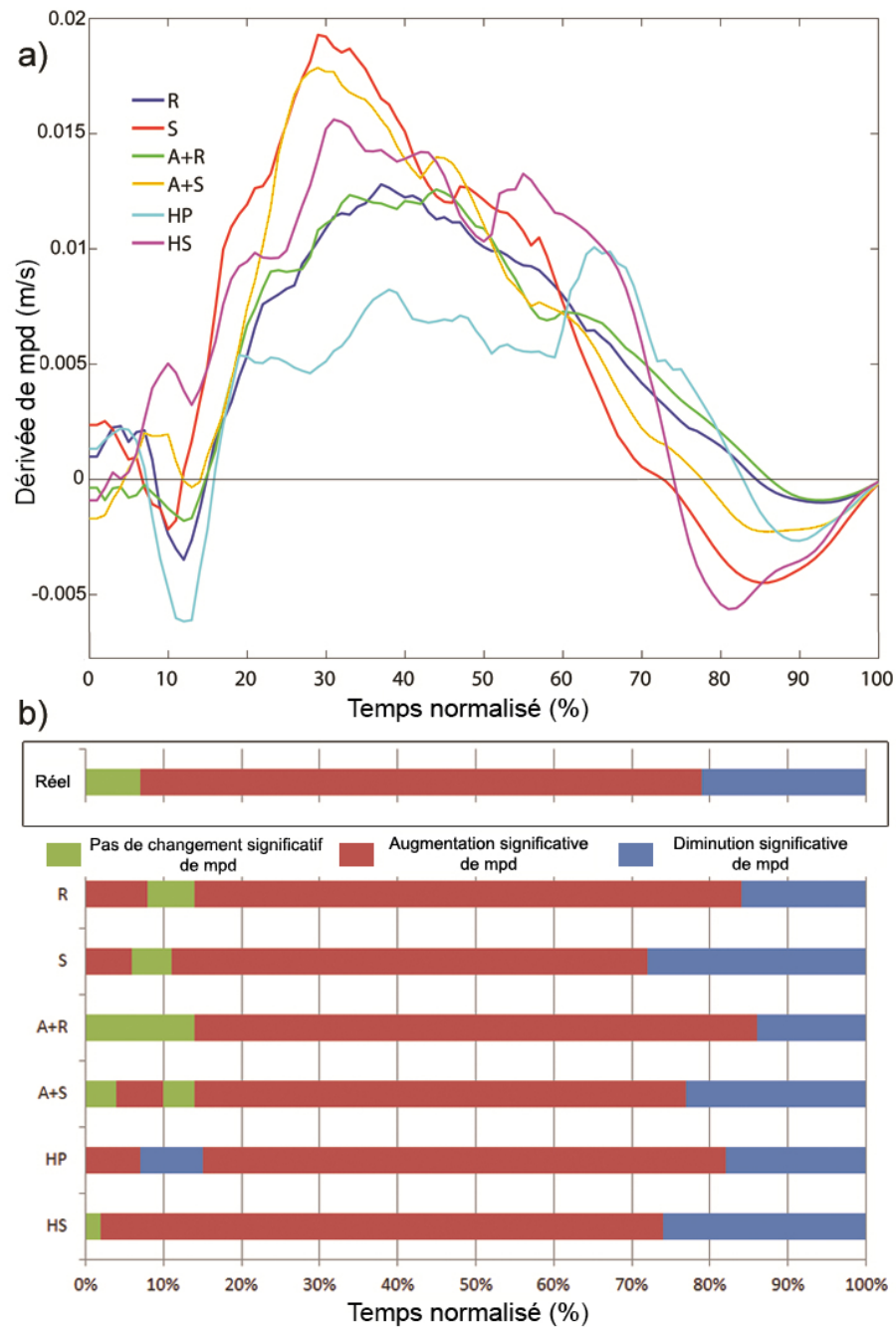


FIGURE 2.29 – a) Évolution moyenne de la dérivée temporelle de mpd durant l'interaction selon les interfaces de locomotion. b) Cette évolution nous permet de décrire différentes phases dans l'évolution de mpd selon que cette dernière soit constante (en vert), augmente (en rouge), ou diminue (en bleu).

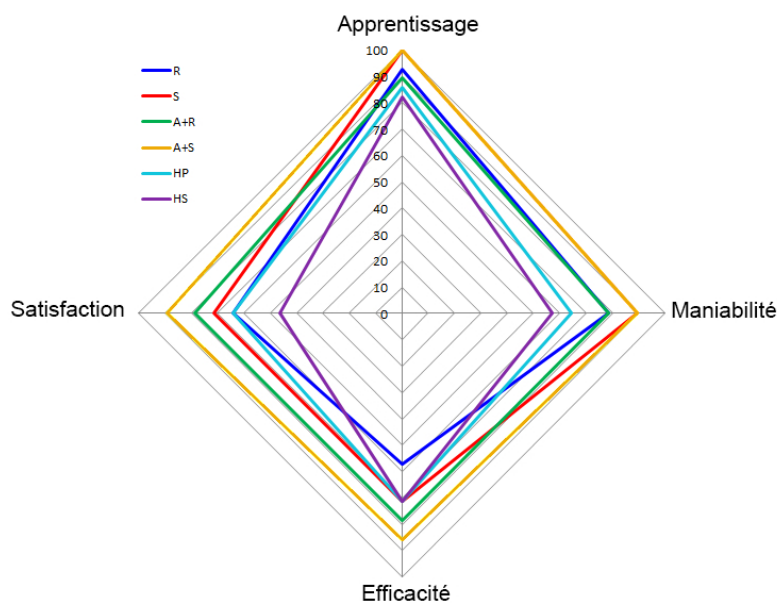


FIGURE 2.30 – Retours subjectifs des participants sur chaque interface de locomotion concernant les critères d'apprentissage, de maniabilité, d'efficacité et de satisfaction (valeurs médianes).

Cette étude a ainsi pu mettre en évidence que, malgré l'existence de différences quantitatives sur la quantité d'adaptation réalisées, la nature des comportements durant l'interaction entre deux marcheurs était préservée en environnement virtuel lorsque les participants se déplaçaient en utilisant des interfaces de locomotion. Si toutes les interfaces sont capables de générer des interactions s'approchant des conditions réelles, les résultats de cette étude convergent vers la conclusion que parmi les interfaces testées, le joystick, combiné à la fonction de transfert **A+R** alliant un mouvement automatique avec un contrôle de l'orientation en vitesse angulaire était le meilleur compromis pour s'approcher au mieux des comportements réels. Différentes limites peuvent être mises en avant comme l'utilisation d'un ensemble restreint d'interfaces de locomotion, ou encore un marcheur passif et neutre qui ne permet pas de considérer l'aspect collaboratif de l'évitement ainsi que les subtilités de la communication non verbale. Ceci ouvre de nombreuses perspectives quant à la prise en compte des facteurs d'influence intervenant dans l'évitement de collision entre deux personnes, facteurs qu'il est aisé de manipuler en conditions virtuelle.

2.4.4 Activité du regard et influence du retour haptique des collisions en réalité virtuelle.

Dans cette dernière section concernant la validation de la réalité virtuelle pour l'étude des interactions entre marcheurs et l'évaluation de l'effet de ses différents composants, nous nous sommes intéressés à la question des systèmes sensoriels mis en jeu durant l'évitement de collision et en particulier l'activité du regard ainsi que l'effet du retour haptique des collisions durant l'interaction.

Activité du regard durant l'évitement de collision en réalité virtuelle

Alors que nous avons montré que la réalité virtuelle permet de générer des interactions réalistes lors d'un évitement de collision avec un marcheur virtuel du point de vue cinématique, il est important de tenir compte des aspects perceptifs impliqués durant cette interaction. Le système visuel a un rôle fondamental dans le guidage de la locomotion (PATLA, 1997 ; WARREN, 1998). Dans ce cadre, nous pensons que l'étude de l'activité du regard peut nous fournir des informations supplémentaires sur la tâche d'évitement de collision et en particulier de mieux comprendre le voisinage d'interaction du marcheur. En effet, lorsqu'un marcheur évolue dans une foule, il est difficile sur la seule base de l'analyse des trajectoires de marche d'identifier avec qui le marcheur interagit. En utilisant un oculomètre en environnement réel, les travaux précédents ont ainsi montré que les marcheurs regardent les éléments de l'environnement qui maximisent le niveau d'information utile pour naviguer en toute sécurité (MARIGOLD et PATLA, 2007). Cinelli et al. (2009) ont montré que l'activité du regard de marcheurs devant passer entre deux portes coulissantes motorisées dépendait de la complexité du mouvement des portes. Dans le cadre de l'interaction entre marcheurs, Kitazawa et Fujiyama (2010) se sont intéressés à l'espace de traitement de l'information (Information Process Space), défini comme une zone au sein de laquelle les objets de l'environnement sont définis comme des obstacles. Ces auteurs ont montré que le regard des marcheurs fixait plus les surfaces au sol que les obstacles, que la plupart des fixations se situaient dans une zone en forme de cône directement en face du marcheur plutôt qu'en forme de demi cercle et que les fixations sur les autres piétons n'étaient pas plus nombreuses que celles allouées

aux obstacles statiques. Croft et al. (2017), ont quant à eux démontré que l'activité du regard permettait de prédire l'ordre de passage lors d'un croisement entre deux marcheurs. Enfin, Jovancevic-Misic et Hayhoe (2009) ont démontré qu'un marcheur regardait principalement les autres marcheurs proches de lui et qui présentaient un comportement plus risqué que les autres (arrivant face à l'observateur sur un chemin de collision). L'intégration des oculomètres dans les casques de réalité virtuelle est une opportunité majeure pour proposer des analyses du regard dans des environnements dont les caractéristiques sont très contrôlées. Quelques auteurs se sont intéressés à évaluer les différences entre des situations réelles et virtuelles. Il a ainsi été montré que des participants, soit marchant dans un campus universitaire, soit observant des vidéos à la première personne de cette marche présentaient quelques différences dans le mouvement des yeux et de la tête mais que les objets de l'environnement étaient fixés dans des proportions comparables (FOULSHAM, WALKER et KINGSTONE, 2011). D'autres études ont trouvé des similitudes quant à l'activité du regard en comparant des tâches réalisées en réel et en virtuel où des participants assis sur une chaise observaient un humain ou un objet (RUBO et GAMER, 2018) ou des stimuli lumineux (PFEIL et al., 2018), malgré de plus nombreuses rotations de la tête (PFEIL et al., 2018).

Notre objectif était donc de comparer l'activité du regard en réel et en virtuel dans des tâches d'interaction entre marcheurs. Dans le cadre de la thèse de Florian Berton et du projet ANR OPMoPS, nous avons mené deux séries d'expérimentations qui considéraient d'une part l'interaction entre deux marcheurs (BERTON et al., 2019) et d'autre part l'interaction dans une foule de marcheurs (BERTON et al., 2020). Les progrès technologiques étant très rapides, nous avons considéré une nouvelle condition expérimentale en réalité virtuelle qui consistait à faire marcher physiquement un participant dans le monde virtuel, le participant portant un casque de réalité virtuelle, relié à un ordinateur disposé sur un sac à dos.

Dans la première étude, nous avons reproduit le protocole de croisement à 90° entre deux marcheurs dans un espace de 9m×9m et avons considéré les conditions suivantes, illustrées sur la figure 2.31 :

- Réel : les participants interagissent avec un confédéré dont le mouvement est effectué en ligne droite à vitesse constante. Ce choix est motivé par le besoin de pouvoir comparer strictement les conditions en réel et en virtuel. Le mouvement du confédéré a alors été enregistré et rejoué en conditions virtuelles. Les participants étaient équipés de l'oculomètre Tobii afin d'enregistrer les mouvements oculaires (50Hz) et la scène observée (25Hz).
- HMD + W : les participants sont équipés d'un casque de réalité virtuelle de type FOVE (70Hz, 100° de champ de vision) intégrant un oculomètre (100Hz), et doivent éviter le marcheur virtuel en se déplaçant physiquement dans l'environnement réel co-localisé.
- HMD + (A+R) : les participants sont équipés d'un casque de réalité virtuelle de type FOVE. Assis, ils doivent éviter le marcheur virtuel en utilisant une manette de jeu vidéo couplée à la fonction de transfert A+R (mouvement automatique couplé à un contrôle de l'orientation en rotation), décrit dans la section précédente.
- CAVE : les participants sont placés dans une salle immersive. Ils portent des lunettes permettant la stéréovision ainsi que l'oculomètre Tobii et se déplacent au moyen d'un joystick couplé à la fonction de transfert A+R.
- Écran : les participants sont assis face à un écran d'ordinateur, la tête maintenue par une mentonnière. Le dispositif EyeTribe permet d'enregistrer les mouvements oculaires (60Hz) et les participants se déplacent au moyen d'un joystick couplé à la fonction de transfert A+R.

Les participants ont réalisé les conditions par bloc (26 essais par bloc) dont l'ordre était randomisé. Tout d'abord, notons que nous avons trouvé des résultats similaires à notre étude précédente qui comparait la cinématique de l'évitement de collision en réel et en virtuel (OLIVIER et al., 2018) : la distance de croisement et le seuil de *mpd* initial déclenchant un évitement de collision étaient plus faibles en conditions réelles. Les évolutions de *mpd* durant la phase d'interaction étaient par ailleurs très similaires pour toutes les conditions.

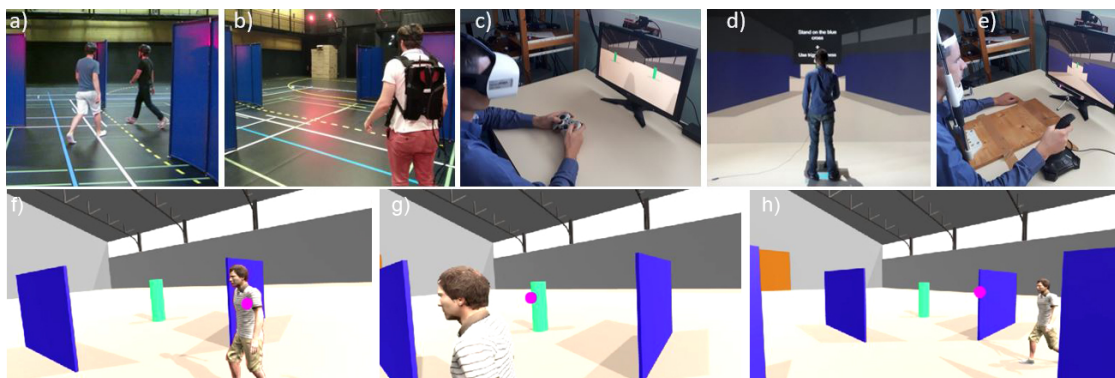


FIGURE 2.31 – Conditions expérimentales pour l'étude de l'activité du regard lors du croisement entre deux marcheurs en réel avec un confédéré (a) et en virtuel en utilisant un casque de réalité virtuelle en marchant (b) ou se déplaçant avec une manette de jeu vidéo (c), dans une salle immersive (d) ou face à un écran d'ordinateur (e). Afin d'analyser les endroits de fixation, nous avons séparé l'environnement en trois catégories : f) l'autre marcheur, g) le but à atteindre h) le reste de l'environnement.

Concernant l'activité du regard, nous avons formulé deux hypothèses :

- H1 : la nature des indices visuels impliqués dans l'interaction entre deux marcheurs est similaire en réel et en virtuel. Les éléments de l'environnement regardés devraient donc être comparables entre ces deux conditions et nous ne nous attendons pas à un effet du type d'affichage (casque, écran, salle immersive).
- H2 : Le type d'affichage influence les mouvements du regard puisqu'ils ne retranscrivent pas le contenu visuel de la même manière, avec notamment un champ de vision limité pour le casque de réalité virtuelle ou l'écran. Notamment, on s'attend à plus de mouvements de tête avec le casque et plus de mouvements oculaires avec l'écran (puisque la tête est immobilisée).

Pour explorer ces hypothèses, nous nous sommes intéressés à différentes variables à savoir, le nombre de fixations (une fixation étant définie comme le maintien du regard sur un objet pendant au moins 80ms autour d'un angle de 3°), la durée moyenne de ces fixations ainsi que la répartition des fixations sur les différents éléments de l'environnement durant l'interaction. Pour cela nous avons segmenté l'image en 3 catégories : l'autre marcheur, le but à atteindre et les autres éléments de l'environnement (cf figure 2.31 f, g et h) et avons associé les fixations, définies à chacune de ces trois catégories. Les résultats ont montré des grandes similarités entre les différentes conditions

expérimentales concernant le nombre et la durée des fixations. Des différences ont été observées pour la condition CAVE mais sont expliquées par des difficultés techniques à enregistrer le mouvement des yeux dans ce type de dispositif. Les résultats concernant la répartition des fixations sur les différents éléments de l'environnement sont illustrés sur la figure 2.32. Les résultats montrent, malgré quelques différences entre les conditions virtuelles, qu'il n'y avait pas de différences significatives entre la condition de référence en réel et celles menées en virtuel. Ces résultats vont dans le sens d'une validation de l'hypothèse H1 : en virtuel, les participants regardent un contenu visuel très similaire à celui regardé en réel, ce qui est en accord avec les travaux de Foulsham et al. (2011).

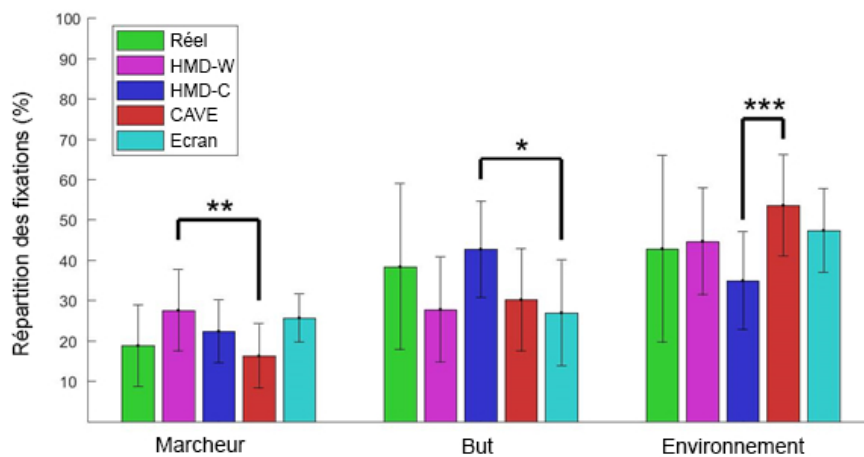


FIGURE 2.32 – Répartition des fixations sur l'autre marcheur, le but à atteindre et les autres éléments de l'environnement lors de l'interaction entre deux marcheurs en conditions réelles et virtuelles.

Nous nous sommes également intéressés à différents angles, illustrés sur la figure 2.33 : l'angle entre la direction du regard et le segment reliant le participant à l'autre marcheur (*Regard-Marcheur*), l'angle entre la direction du regard et le segment reliant le participant au but à atteindre (*Regard-But*), l'angle entre la direction de la tête et la direction de la marche (*Tête-Direction du mouvement*, non pris en compte dans la condition écran puisque la tête est bloquée dans la mentonnière) et enfin l'angle entre la direction du regard et celle de la tête (*Regard-Tête*).

Nous pouvons tout d'abord mettre en avant une différence entre les conditions réelles et virtuelles au début de l'interaction (quand l'autre marcheur apparaît derrière les

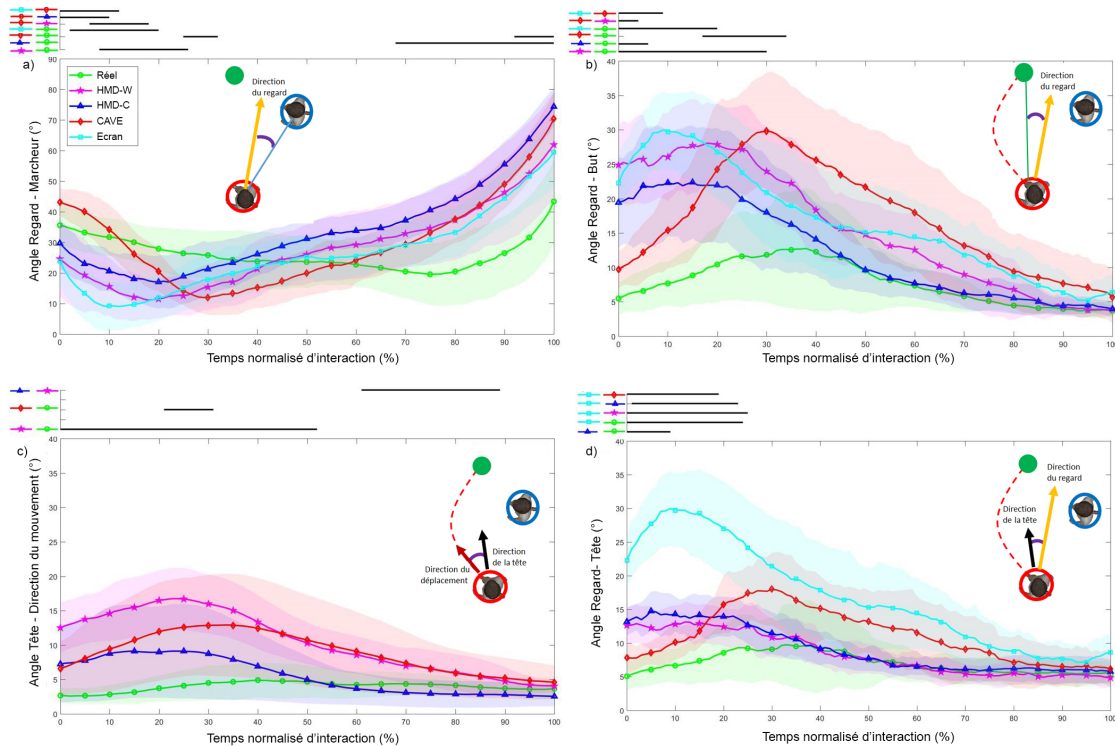


FIGURE 2.33 – Évolution des angles *Regard-Marcheur* (a), *Regard-But* (b), *Tête-Direction du mouvement* (c) et *Regard-Tête* (d) pour les différentes conditions expérimentales durant la phase d'interaction normalisée (Moyenne $\pm$ SD). Une analyse SPM (Statistical Parametric Mapping) montre un effet des conditions expérimentales sur chacun de ces angles. Les différences significatives post-hoc sont représentées au dessus de chaque figure par une ligne noire qui indique la période pendant laquelle on observe une différence entre deux conditions.

panneaux occultants) pour les angles *Regard-Marcheur* et *Regard-But*. Sur la figure 2.33a et b, on remarque une diminution de l'angle *Regard-Marcheur* associé à une augmentation de l'angle *Regard-But* : les participants regardent progressivement plus vers le marcheur à éviter et moins vers le but à atteindre au début de l'interaction. Néanmoins, l'amplitude de ces variations est plus faible en réel qu'en virtuel, suggérant que la vision périphérique puisse jouer un rôle plus important en réel. Ces variations apparaissent également plus tard en réel et en condition CAVE ce qui va également dans le sens d'un effet probable de la vision périphérique dans ces deux conditions. Il semblerait ainsi que le champ de vision limité dans le casque de réalité virtuelle entraîne les participants à regarder activement l'autre marcheur plus tôt dans l'interaction.

Concernant l'angle *Tête-direction du mouvement*, les résultats mettent en avant une différence significative principalement entre la condition réelle et la condition HMD-W

durant la première moitié de l'interaction, avec un angle plus élevé pour cette dernière. Ceci indique que les participants bougent avec une plus grande amplitude leur tête relativement à la direction de mouvement au début de l'interaction lorsqu'ils marchent physiquement avec un casque de réalité virtuelle mais montrent un pattern similaire sur le mouvement des yeux (angle *Regard-Tête*). De manière surprenante, nous n'avons pas observé une telle différence entre la condition réelle et la condition HMD-C, qui pourtant présente les mêmes caractéristiques de limitation du champ visuel : dans cette condition, les participants engagent un mouvement plus important des yeux et moins de rotation de la tête. Ceci met en avance l'importance de considérer l'interface de locomotion utilisée. Enfin, comme on pouvait s'y attendre, on remarque un comportement très singulier de l'angle *Regard-Tête* pour la condition Ecran avec des valeurs beaucoup plus élevées en début d'interaction. Ceci s'explique par le fait que les mouvements de la tête sont impossibles en raison de la mentonnière. Ainsi, ces résultats valident notre deuxième hypothèse selon laquelle, les mouvements qui caractérisent le regard sont influencés par les conditions d'environnement virtuel utilisées dans la tâche d'évitement de collision entre deux marcheurs.

Ces résultats montrent ainsi que les caractéristiques des fixations sont très similaires entre les conditions réelles et virtuelles mais que la manière dont les participants explorent l'environnement dans lequel ils interagissent dépend du dispositif expérimental utilisé en environnement virtuel. Ces résultats suggèrent que l'usage de la réalité virtuelle pour l'analyse du regard dans le cadre de l'interaction entre deux marcheurs est pertinente si on souhaite explorer des aspects qualitatifs mais que l'exploration des mouvements associés au regard doit être réalisée avec précaution.

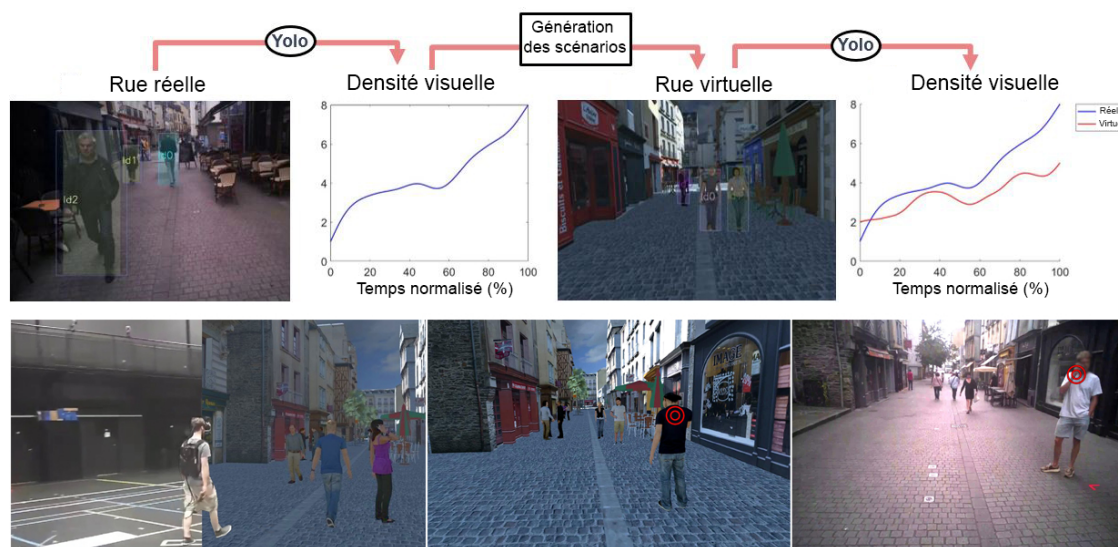


FIGURE 2.34 – Procédure expérimentale pour évaluer l’effet de la réalité virtuelle sur l’activité du regard d’un marcheur dans une rue où se déplacent d’autres marcheurs. Après avoir marché dans une rue réelle avec un oculomètre, les données vidéos sont traitées par un algorithme d’apprentissage profond afin d’extraire la densité de piétons vue durant la navigation. Ce résultat est alors utilisé pour générer un scénario en réalité virtuelle afin que le même marcheur puisse naviguer dans cette même rue virtuelle dans les conditions les plus proches afin de pouvoir comparer l’activité oculaire entre les conditions réelles et virtuelles.

Afin d’apporter d’autres éléments quant à l’usage de la réalité virtuelle pour l’étude des données liées au regard, et notamment sur la généralisation de ces résultats à des scénarios plus complexes, nous avons développé une seconde étude, qui considèrerait cette fois-ci une tâche où un participant naviguait dans une rue où se déplaçaient plusieurs marcheurs. La procédure expérimentale est illustrée sur la figure 2.34. Dans un premier temps, les participants étaient conviés dans la rue Vasselot de Rennes. Après avoir été équipés de l’oculomètre Tobii, les participants devaient marcher d’un bout à l’autre de la rue, et ceci était répété 4 fois. Durant cette condition, le mouvement des yeux du marcheur ainsi que la scène visualisée étaient enregistrés. Les données vidéos ont été ensuite analysées par les algorithmes d’apprentissage profond Yolo (REDMON et FARHADI, 2018) et DeepSort (WOJKE, BEWLEY et PAULUS, 2017) afin d’identifier les autres personnes présentes dans l’environnement pour définir une densité visuelle de piétons et pour les classer selon la nature de leur comportement (statiques, marchant dans la même direction ou dans la direction opposée au participant). Ceci a permis de générer pour chaque participant, en

utilisant un modèle 3D fidèle de cette rue et les données sur les piétons rencontrés (densité visuelle, nature des comportements) des scénarios virtuels avec des caractéristiques très proches de ceux réalisés en conditions réelles. Les participants étaient alors conviés à une nouvelle expérience en virtuel, où il leur était demandé de traverser 4 fois la rue virtuelle générée en marchant dans un gymnase. Ils étaient alors équipés d'un casque de réalité virtuelle de type FOVE intégrant un oculomètre. Notre analyse a alors consisté à comparer le mouvement des yeux en réel et en virtuel (cf. figure 2.34 bas), en s'intéressant aux variables suivantes : la durée des fixations, l'amplitude des saccades oculaires mesurée en degrés entre deux fixations, le pic de fixation qui indique où les participants ont le plus focalisé leur regard ainsi que la zone couverte par les fixations en nombre de pixels. Les détails techniques permettant de définir la carte de fixation se trouvent dans le papier (BERTON et al., 2020). Notre analyse a reposé sur 3 hypothèses :

- H1 : Les caractéristiques de l'environnement réel étant fidèlement reproduites en virtuel (rue, bâtiments, géométrie, même densité de personnes), la tâche réalisée par les participants est donc identique dans les deux conditions. On s'attend donc à ce que la durée des fixations oculaires, le pic de fixation ainsi que l'amplitude des saccades entre deux fixations soient similaires dans les deux conditions.
- H2 : L'environnement virtuel est affiché à travers un casque de réalité virtuelle. Ceci réduit le champ de vision des participants en comparaison avec les conditions réelles. Ainsi, on s'attend à une différence dans la distribution spatiale des fixations avec une aire couverte par les mouvements des yeux plus faible en virtuel.
- H3 : La tâche principale étant de marcher à l'autre bout de la rue, qui est un point central dans le champ de vision des participants, on s'attend à ce que les fixations oculaires soient centrées dans le champ de vision.

Les résultats ont montré des différences sur l'activité oculaire entre les conditions réelles et virtuelles. Tout d'abord, la durée des fixations est plus grande en virtuel (cf figure 2.35a). On pourrait attribuer cette différence à plusieurs facteurs. Le niveau de détails de l'environnement virtuel, qui malgré sa grande qualité manque de détails (oiseaux, bruit environnant,...), a pu attirer l'attention visuelle des participants en réel et provoquer des

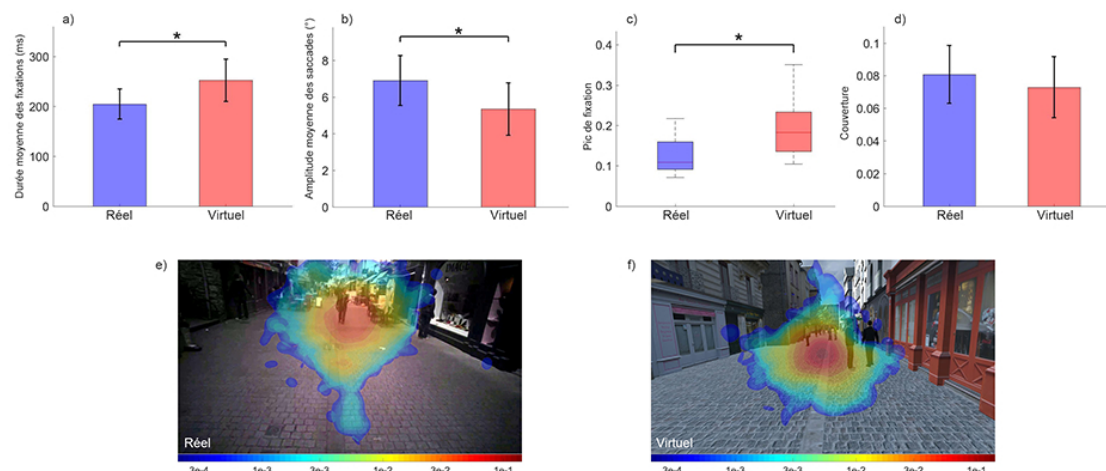


FIGURE 2.35 – Comparaison des données oculaires durant la navigation dans une rue réelle et virtuelle pour les variables suivantes : a) durée moyenne des fixations, b) amplitude moyenne des saccades, c) pic de fixation, d) zone couverte par le regard et illustration de la carte de fixation en réel (e) et virtuel (f).

fixations plus courtes. Dans ce sens, certains auteurs relient la durée des fixations avec les notions d'exploration (courte fixation) et d'exploitation de l'information (fixation plus longue) (KÖNIG et al., 2016). On peut également s'interroger sur le coût attentionnel de la marche qui pourrait être supérieur en réalité virtuelle dans ce type de scène complexe. Dans ce sens, il a été mis en évidence une corrélation positive entre le coût de la tâche et la durée des fixations (MEGHANATHAN, LEEUWEN et NIKOLAEV, 2015). Si on s'intéresse à présent aux saccades oculaires, on peut noter que leur amplitude est plus faible en virtuel (cf figure 2.35b). Le pic de fixation se situait quant à lui de manière plus intense au centre du champ de vision en réalité virtuelle (cf figure 2.35c). Ces résultats ne permettent ainsi pas de valider notre hypothèse H1 en raison des différences observées en réel et virtuel. Par ailleurs, nous n'avons pas pu mettre en évidence de différences quant à la taille de la zone couverte par le regard en réel et virtuel (cf figure 2.35d), ce qui invalide notre hypothèse H2, qui reposait sur le fait que le champ de vision était réduit dans le casque de réalité virtuelle. Nous pouvons discuter ce résultat en mettant en avant que la tâche réalisée en ligne droite ne nécessitait sans doute pas un besoin d'explorer les zones périphériques, n'affectant pas ainsi la zone couverte par le regard. Enfin, les participants présentaient une distribution du regard centrée dans le champ de

vision, validant l'hypothèse H3 (cf figure 2.35e,f).

Ces résultats nous montrent ainsi les limites de la réalité virtuelle à reproduire avec fidélité des situations complexes pour lesquelles l'activité du regard du marcheur est similaire à celle obtenue en réel. Cela ne veut pas dire qu'il ne faut pas continuer à explorer les pistes sur ce sujet. Notamment, malgré des différences quantitatives, nous pouvons mettre en avant de grandes similitudes sur le plan qualitatif. L'étude des interactions entre piétons étant complexe, notamment dans le cas d'une foule, il semble ainsi intéressant de développer de nouvelles expérimentations en virtuel, non pas dans le but d'obtenir des valeurs chiffrées précises transposables en virtuel, mais plutôt d'évaluer l'effet de manipulation de paramètres au sein des différents niveaux de ce facteur en réalité virtuelle.

Avant de clore ce chapitre sur la question de la validation de la réalité virtuelle pour l'étude des interactions entre deux marcheurs, nous allons présenter des travaux récents sur une autre modalité sensorielle impliquée en considérant l'effet de l'ajout d'un retour haptique pour matérialiser physiquement la collision avec un marcheur virtuel.

Effet du retour haptique des collisions lors de la navigation dans un environnement encombré

Malgré les efforts fournis par différentes équipes pour valider la fidélité du comportement humain en réalité virtuelle durant la locomotion, la plupart des expériences immersives ne considèrent pas la question de la sensation tactile. Cette dernière prend évidemment un sens majeur quand on considère la tâche d'évitement de collision, notamment dans une foule dense. Ne pas pouvoir restituer les collisions physiques entre un utilisateur et des humains virtuels dans cette situation pourrait influencer le comportement de l'utilisateur arrêtant d'éviter les collisions s'il se rend compte que le contact virtuel n'a aucune conséquences physiques. Quelques études ont fourni des premiers résultats sur la question de l'effet de la restitution des collisions par retour haptique. Par exemple, Mestre et al. (2016) ont développé une expérience où des participants devaient passer au travers une porte dont la largeur variait avec ou sans retour haptique, avec ou sans représentation du corps de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Le retour haptique se manifestait par une vibration au niveau des épaules lorsque ce dernier s'approchait

de moins de 10 cm de la porte. Les auteurs ont observé des comportements généraux similaires pour les différentes conditions. En revanche, les auteurs mettent en avant un comportement optimal d'évitement de collision lorsque à la fois le retour haptique et la représentation visuelle du corps de l'utilisateur sont activés. Dans une tâche en interaction avec un humain virtuel, Krogmeier et al. (2019) ont mis en place une expérience pour laquelle des participants devaient percuter un humain virtuel, avec ou sans restitution des contacts. Le retour haptique était effectué grâce au système "Tactsuit1". Leurs premiers résultats ont montré que la restitution des contacts améliorait le sentiment de présence et d'incarnation (embodiment), variables importantes à une bonne expérience immersive. Krum et al. (2018) ont quant à eux évalué l'effet de la sensation tactile avant d'interagir avec un marcheur virtuel (haptic priming) : dans ce cas, les auteurs avaient simulé le fait que l'humain virtuel touchait l'utilisateur. Les résultats ont montré que ce contact initial n'influencait pas les variables liées à la proxémie mais en revanche améliorait les relations de sympathie de l'utilisateur pour l'humain virtuel. Enfin, Faure et al. (2019) ont demandé à des participants de réaliser une tâche d'évitement de collision avec un marcheur virtuel sur un tapis roulant. Les auteurs utilisaient un mécanisme basé sur des câbles appliquant une force au niveau des épaules du participant afin de simuler les collisions. Leurs résultats ont alors montré que la distance de croisement augmentait et que la stratégie d'évitement était initiée plus tôt avec le retour haptique des collisions.

Les études menées par les auteurs ont considéré le cas du retour haptique des collisions dans des tâches locomotrices mais ne s'étaient pas intéressées à la situation de navigation dans une foule dense d'humains virtuels. L'objectif de notre travail était alors d'évaluer l'effet du retour haptique des collisions sur la cinématique de la locomotion du participant et sur des critères plus subjectifs comme le sentiment d'incarnation et de présence. Nous avons développé une expérience où 23 participants devaient se déplacer dans une foule virtuelle statique au sein d'un hall de gare afin de se rendre devant le tableau d'affichage des trains. Les participants étaient équipés d'une combinaison de type X-sens pour recueillir leur positions au cours du temps, d'un casque de réalité virtuelle Pimax relié à un ordinateur disposé sur un sac à dos et de bracelets à retour haptique

(SCHEGGI, AGGRAVI et PRATTICIZZO, 2016) (un sur chaque bras et avant-bras) qui vibraient en cas de collision avec un humain virtuel (cf figure 2.36). Les participants effectuaient le protocole selon 3 blocs, toujours dans le même ordre *NoHaptic1* (pas de retour haptique), *Haptic* (retour haptique des collisions) et *NoHaptic2* (pas de retour des collisions). Pour chaque bloc, 8 essais étaient réalisés. Pour chacun des 8 essais, la position des humains virtuels était modifiée. Notons que ces positions étaient modifiées de manière identique pour les 3 blocs.



FIGURE 2.36 – Illustration de l’expérience sur l’effet du retour haptique des collisions lors de la navigation dans une foule : équipés de bracelets à retour haptique sur chaque bras et avant bras, les participants, dont le point de départ est illustré par la croix bleue, devaient traverser une foule d’humains virtuels statiques afin de rejoindre le tableau d’affichage du hall de gare. Lorsqu’ils étaient activés, les bracelets vibraient si les participants entraient en collision avec un humain virtuel.

Nous avons formulé 4 hypothèses :

- H1 : Le retour haptique des collisions ne modifie pas le chemin suivi par les participants. En effet, la vision possède un rôle majeur dans le contrôle de la locomotion (PATLA, 1997 ; WARREN, 1998). Le fait que nous ayons répliqué des configurations de foule identiques dans les 3 conditions assure que le contenu visuel sera le même.
- H2 : Le retour haptique des collisions permet aux participants de prendre conscience des collisions et ainsi de mettre en place des stratégies d’évitement. On s’attend ainsi à plus de mouvement local d’évitement de collision comme par exemple une augmentation des mouvements de rotations des épaules, à une diminution

de la vitesse de marche, résultant en moins de collision pour le bloc *Haptic* en comparaison avec le bloc *NoHaptic1*

- H3 : Il existe des effets persistants du retour haptique des collisions même quand ce dernier n'est plus activé. Ainsi, on s'attend à ce que H2 soit aussi vérifiée pour la condition *NoHaptic2*
- H4 : Le retour haptique des collisions augmente le sentiment de présence et d'incarnation, car il permet aux participant d'avoir une meilleure représentation de leur dimensions corporelles en lien avec les humains virtuels avoisinants.

En se basant sur les positions des humains virtuels et celles des participants au cours du temps, nous avons tout d'abord calculé les similitudes entre les trajectoires de marche dans les différentes conditions. Pour cela, l'environnement a été décomposé en cellules en se basant sur une triangulation de Delaunay (CHEW, 1989). Les sommets des cellules correspondent aux positions des humains virtuels. La trajectoire est alors exprimée comme une succession de cellules traversées. Une indice de similarité a alors été calculé sur la base des cellules traversées (DICE similarity coefficient (SØRENSEN, 1948)). Nous avons par ailleurs calculé les mouvements de rotation des épaules mesurés lors du passage entre deux humains virtuels (angle entre la ligne des épaules et le segment reliant les deux humains virtuels, plus cet angle est élevé, plus le participant tourne les épaules), la vitesse moyenne de marche, et le nombre de collisions. Enfin, après chaque bloc, les participants ont répondu à deux questionnaires pour mesurer le sentiment de présence (SUS, USOH et al., 2000) et le sentiment d'incarnation (ROTH et LATOSCHIK, 2019).

Les résultats ont tout d'abord montré une grande similarité entre les trajectoires de marche réalisées, comme illustré sur la figure 2.37, ce qui valide notre hypothèse H1 sur l'importance des informations visuelles dans la génération de la trajectoire locomotrice.

Concernant les variables que nous avons mises en perspective d'un évitement de collision, les résultats montrent que le retour haptique des collisions a un effet sur les mouvements de rotation des épaules : les participants tournaient plus leurs épaules pour passer entre deux humains virtuels durant la condition *Haptic* en comparaison avec la condition *NoHaptic1* (cf. figure 2.38a). Ceci est en accord avec les observations de

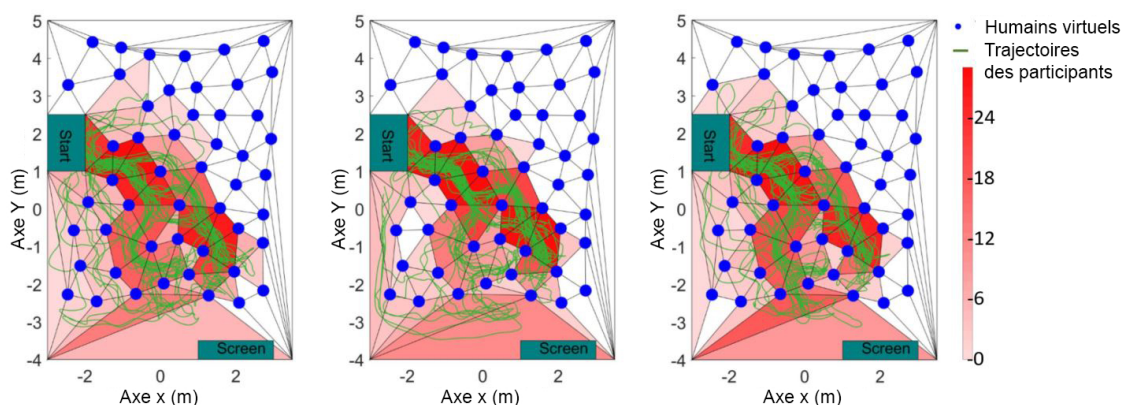


FIGURE 2.37 – Trajectoires de marche obtenues pour un essai en fonction de la condition de retour haptique. L'échelle de couleur indique combien de fois une cellule a été traversée. Les résultats montrent une très grande similarité entre les trajectoires réalisées.

Mestre et al. (2016) dans le cas d'un retour haptique lors d'un franchissement de porte. On observe également que les participants marchaient moins vite dans la condition *Haptic* ce qui suggère que les participants marchaient avec plus de précaution (cf. figure 2.38b). Enfin, le nombre de collisions était plus faible dans la condition *Haptic* (cf. figure 2.38c). Ces résultats sont en accord avec la littérature montrant que le retour haptique des collisions diminue le nombre de collision avec des objets statiques (LOUISE, FERLAY et MESTRE, 2018). Ces résultats valident ainsi notre hypothèse H2 selon laquelle le retour haptique des collisions entraîne une adaptation du mouvement des participants qui permet de réduire le nombre de collisions avec les humains virtuels.

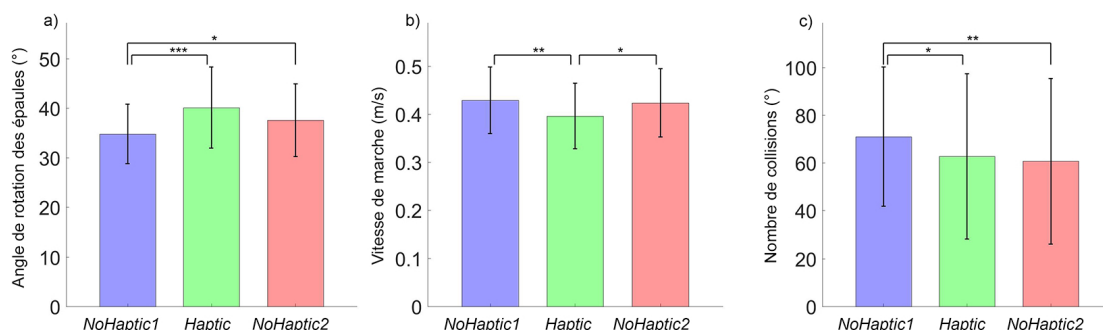


FIGURE 2.38 – Effet du retour haptique des collisions sur la rotation des épaules (a), la vitesse de marche (b) et le nombre de collisions (c).

Alors que nous avons observé moins de collisions et plus de rotations d'épaules dans la condition *Haptic* en comparaison avec la condition *NoHaptic1*, nous n'avons pas trouvé de différences significatives entre les conditions *Haptic* et *NoHaptic2* sur ces paramètres. Ceci va dans le sens de notre hypothèse H3 concernant la possibilité d'effets persistants du retour haptique des collisions sur le comportement du participant. Cependant il faut noter que nous n'avons pas observé d'effet persistant sur la vitesse de marche des participants, qui était plus élevée dans la condition *NoHaptic2*. On pourrait attribuer cette augmentation à une plus grande familiarisation pour cette condition avec l'environnement virtuel, puisque cette condition a été réalisée en dernier lors de l'expérience. Ces résultats ouvrent des perspectives pour la création de nouvelles expériences sur les interactions entre marcheurs en incluant des tâches de mises en situation avec un retour haptique (haptic priming) des collisions avant de réaliser la tâche principale sans retour haptique, à l'image du paradigme qu'avaient proposé Krum et al. (2018) dans une autre tâche expérimentale.

Enfin, en contradiction avec notre hypothèse H4, nous n'avons pas pu mettre en évidence des modifications du sentiment de présence et d'incarnation chez nos participants suite à l'activation du retour haptique des collisions. Ce résultat est surprenant dans la mesure où nous avons observé des différences quant aux actions réalisées. Il faut noter que les scores des questionnaires étaient déjà élevés durant la condition sans retour haptique, laissant peu de possibilité d'amélioration pour mettre en avant un effet du retour haptique des collisions. Par ailleurs il est possible que le choix du type de retour haptique ou sa localisation ait eu une influence sur la sensation de contact.

Ainsi, cette étude a pu mettre en avant que le retour haptique des collisions est un point intéressant à considérer pour l'étude des interactions entre marcheurs en réalité virtuelle car il affecte la manière dont un participant se déplace dans une foule virtuelle. Alors que le trajet suivi est très similaire, de nouvelles stratégies d'évitement de collision peuvent être mises en évidence et ces stratégies perdurent en partie à l'arrêt du retour haptique des collisions. Le contenu visuel disponible est sans nul doute le point fondamental à préserver lorsqu'on met en place une étude en réalité virtuelle mais sa combinaison avec

des informations haptiques améliore le réalisme de l'interaction, puisqu'on observe des comportements qui cherchent à éviter le contact avec les humains virtuels. Des travaux futurs sont nécessaires pour considérer l'effet du retour haptique dans des situations où les humains virtuels sont mobiles et interactifs avec le participant suite à la collision mais également sur la nature du retour haptique à considérer, le nombre de capteurs et leur placement.

2.4.5 Conclusion

Cette section a permis de présenter l'ensemble de mes travaux, réalisés en collaboration étroite avec mes collègues de l'Inria Rennes, sur la question de l'évaluation de la réalité virtuelle comme outil pertinent pour l'analyse des interactions entre marcheurs. Nous avons ainsi mené une série d'expérimentations qui avaient pour objectif de comparer de manière la plus objective et exhaustive les comportements d'évitement de collision entre marcheurs, mis en place dans des situations en environnement virtuel en comparaison avec des situations réelles. Nous avons principalement répliqué nos expériences menées par le passé en réel et avons soigneusement comparé les métriques d'interactions qui caractérisent l'évitement de collision. Nous avons considéré différents systèmes d'affichage ainsi que différentes interfaces de locomotion. Le résultat commun à ces études réside dans le fait que des grandes similarités caractérisent les comportements réalisés en environnement réel et virtuel. Malgré des différences quantitatives en terme de distance de croisement, qui peuvent être mises en lien avec la question de la compression des distances en réalité virtuelle, nous avons pu montrer que la nature des adaptations était préservée. D'autres auteurs ont travaillé sur la question de l'interaction entre marcheurs en réalité virtuelle au même moment que nous et ont pu mettre en avant des résultats similaires dans une tâche d'évitement de collision avec un obstacle fixe en marchant avec un casque de réalité virtuelle (BÜHLER et LAMONTAGNE, 2018). Le plus intéressant, c'est que ces similitudes ont été observées même lorsqu'on demande à un participant de se déplacer au moyen d'un joystick. Nous interprétons ce résultat par le rôle majeur du flux optique dans le contrôle du mouvement. Ceci renvoie également aux études portant sur la relation entre la courbure de la trajectoire et la vitesse de déplacement (cf section 2.1.2) où les auteurs ont proposé une analogie entre le contrôle du mouvement de la main et le contrôle du corps (HICHEUR, VIEILLEDENT et BERTHOZ, 2005).

Ces résultats offrent un champ d'application large pour l'utilisation de cette technologie dans le cadre de l'étude des interactions entre marcheurs. Alors qu'une étude seule en virtuel semble insuffisante si on souhaite recueillir des données quantitatives sur les comportements d'évitement de collision transposables aux situations réelles (e.g., une

donnée précise sur une distance de croisement), la réalité virtuelle prend tout son sens pour des études plus qualitatives. Nous avons pu montrer par exemple des effets similaires lors de l'interaction avec un humain ou un objet en réel et en virtuel (ARGELAGUET SANZ et al., 2015). Les possibilités offertes par la réalité virtuelle permettent d'explorer de nouvelles questions de recherche quant à l'influence de différents facteurs qu'ils soient liés aux caractéristiques des individus ou de la situation. On peut également imaginer utiliser la réalité virtuelle dans ce cadre comme outil de diagnostic clinique et de suivi de patients sur les questions de couplage visuo-moteur et d'interaction avec l'environnement. Ainsi le nombre d'études s'intéressant à la question des interactions entre marcheurs en utilisant la réalité virtuelle est grandissant. Par exemple, dans une tâche d'évitement de collision avec un humain virtuel, les travaux récents ont évalué l'effet mouvements segmentaires de l'humain virtuel à éviter (FISSET, LAMONTAGNE et MCFADYEN, 2020) ou encore l'influence de la lecture d'un message téléphonique lors de l'évitement de collision chez des jeunes adultes et des personnes âgées (SILVA et al., 2020). A ce titre, nous avons par exemple utilisé le paradigme de croisement en réalité virtuelle pour investiguer la nature des informations considérées sur le mouvement du marcheur dans le cadre de la thèse de Sean Lynch (cf. figure 2.39 haut, LYNCH et al., 2017). En particulier, la question était de comprendre si le marcheur considérait des aspects locaux, comme le mouvement des segments, ou plutôt globaux, sur le corps dans son ensemble, afin d'interpréter de manière correcte le mouvement du marcheur à éviter. Ainsi, grâce à la réalité virtuelle nous avons pu concevoir des situations d'évitement de collision où des participants interagissaient avec un humain virtuel (notre référence de comparaison), des jambes ou un torse (pour les aspects locaux), un centre de masse ou alors un cylindre de mêmes dimensions que l'humain virtuel (pour les aspects globaux). Les résultats principaux mettent en avant que dans ce type de tâche, les indices extraits du mouvement global sont suffisants pour garantir une interaction réaliste. Ceci a par exemple des implications sur le design d'humains virtuels dans des simulations complexes où la priorité sera de garantir un mouvement global correct. Dans une autre étude menée durant la thèse de Sean Lynch, nous nous sommes intéressés à l'influence du contact visuel par le regard du marcheur à éviter sur les stratégies d'évitement de collision (cf figure 2.39 bas,

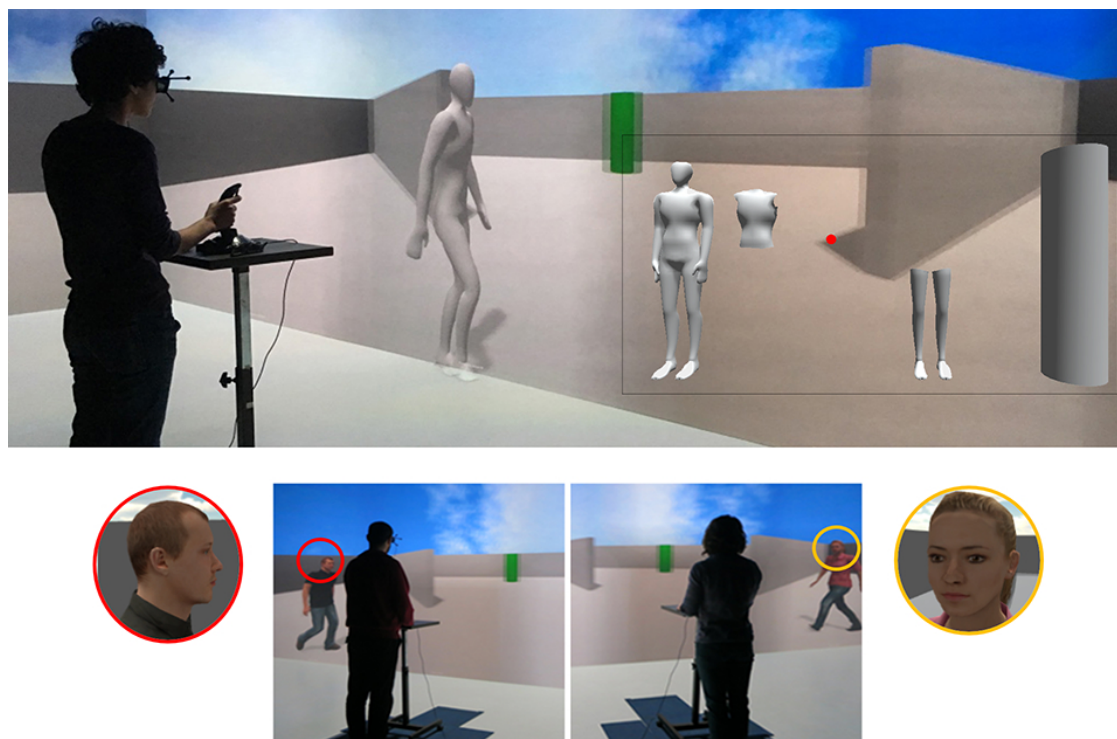


FIGURE 2.39 – Cas applicatifs de l'utilisation de protocoles en réalité virtuelle pour l'étude de la nature des indices visuels pris en compte sur le mouvement du marcheur à éviter (haut) ou de l'effet du contact visuel par le regard.

LYNCH et al., 2018). En effet le rôle du contact visuel durant les interactions sociales est fondamental et jusqu'à présent dans nos paradigmes expérimentaux en réalité virtuelle, nous n'avions jamais manipulé cette variable. Nous avons pu développer une étude où des participants évitaient une collision avec un humain virtuel du même sexe, qui regardait ou non le participant au début de la phase d'interaction, et réagissait ou non à ce dernier en adaptant sa trajectoire locomotrice, créant des situations concordantes (e.g., contact visuel avec adaptation de mouvement) ou non (e.g., contact visuel sans adaptation de mouvement). Il était alors aisé de standardiser les instants et la manière avec laquelle l'humain virtuel regardait le participant. De manière inattendue, nos résultats n'ont pas mis en avant d'effet du contact visuel par le regard dans ce type de situation, alors que les participants ont bien noté les facteurs manipulés durant notre expérience. Nous interprétons ces résultats principalement par notre situation expérimentale où les indices liés au mouvement seraient suffisants pour percevoir la nature de l'interaction. Dans

une tâche en face-à-face où une ambiguïté sur le côté du changement de direction peut exister, les auteurs avaient mis en avant un rôle important de la direction du regard pour prendre une décision sur le côté de la manœuvre d'évitement (NUMMENMAA, HYÖNÄ et HIETANEN, 2009 ; VARMA, GUY et INTERRANTE, 2017).

Un champ important de recherche demeure néanmoins à développer sur la question des plateformes de réalité virtuelle pour l'étude du comportement humain. Tout d'abord nous avons principalement considéré le cas d'humains virtuels passif dans nos situations d'évitement de collision, cas d'étude qui s'éloigne des interactions usuelles où les différentes personnes impliquées contribuent à l'interaction. Il semble ainsi fondamental de travailler sur la question des humains virtuels réactifs et expressifs dans nos paradigmes expérimentaux. On peut citer par exemple l'étude de Cafaro et al. (CAFARO et al., 2016) qui a mis en évidence l'effet des attitudes interpersonnelles d'un groupe d'humains virtuels (attitude plaisante ou non envers les membres du groupe et les membres extérieurs au groupe) dans une situation de conversation sur les question de présence et de proxémie de participants prenant part à l'interaction. Un autre aspect concerne la meilleure compréhension des différences observées entre les conditions réelles et virtuelles. La question de la réduction du champ de vision dans les casques de réalité virtuelle est souvent avancée. Les nouvelles avancées technologiques permettent de voir arriver sur le marché des nouveaux casques avec un très grand champ de vision. Il serait intéressant de développer de nouveaux paradigmes avec ces dispositifs, mais également de réaliser des expériences en réel avec une limitation du champ de vision dans des tâches d'interactions entre marcheurs. L'analyse du regard en réalité virtuelle est également un aspect majeur à creuser. Des travaux récents de Hessels et al. (HESSELS et al., 2020) dans le cas où un marcheur croise d'autres personnes en situations réelles montrent que l'activité du regard est dépendante de la tâche. Il serait ainsi intéressant de vérifier si cette caractéristique est préservée en environnement virtuel, allant ainsi dans le sens d'études possibles sur des aspects qualitatifs, fondamentaux pour comprendre les interactions non verbales entre marcheurs. Un point important réside enfin dans le fait de mettre en relation l'activité du regard avec les manœuvres d'évitement de collision en considérant

cette activité, non pas de manière globale sur l'ensemble de l'essai mais en analysant sa dynamique temporelle en lien avec le mouvement du participant et les caractéristiques de la situation d'interaction. Ceci permettrait de mieux comprendre les informations utilisées dans la tâche d'évitement de collision.

Ces deux premières sections du bilan de mon activité recherche ont permis de présenter nos travaux sur la mise en place d'un nouveau paradigme de croisement entre marcheurs et la définition de nouvelles métriques d'interaction, ainsi que nos efforts pour valider l'usage de la réalité virtuelle pour l'analyse des interactions entre marcheurs. Pour l'ensemble de ces études, nous avons considéré principalement l'interaction entre deux jeunes adultes, dans des conditions de marche en ligne droite. On peut alors s'interroger sur la validité de nos conclusions sur les coordinations visuo-motrices mises en place dans les situations d'interaction entre marcheurs dans le cas où les facteurs situationnels ou individuels sont modifiés. Je vais ainsi présenter dans une dernière partie les travaux que nous avons menés sur cette question.

2.5 Facteurs d'influence

Cette section vise à présenter mes travaux qui ont porté sur la question des facteurs d'influence des coordinations visuo-motrices impliquées lors des interactions non verbales entre marcheurs. Je vais présenter dans un premier temps une sélection d'études qui se sont intéressées aux facteurs situationnels, c'est-à-dire les facteurs liés aux caractéristiques de la situation d'interaction, indépendantes des caractéristiques personnelles des individus. Dans ce cadre, les études concernant la question du risque de collision et l'effet de la nature de la trajectoire de l'obstacle à éviter seront présentées. Dans un deuxième temps, je présenterai les études en lien avec les facteurs individuels, liés directement aux caractéristiques propres des individus impliqués dans l'interaction, en considérant l'effet de l'âge mais également l'effet d'une commotion cérébrale. En addition à ces

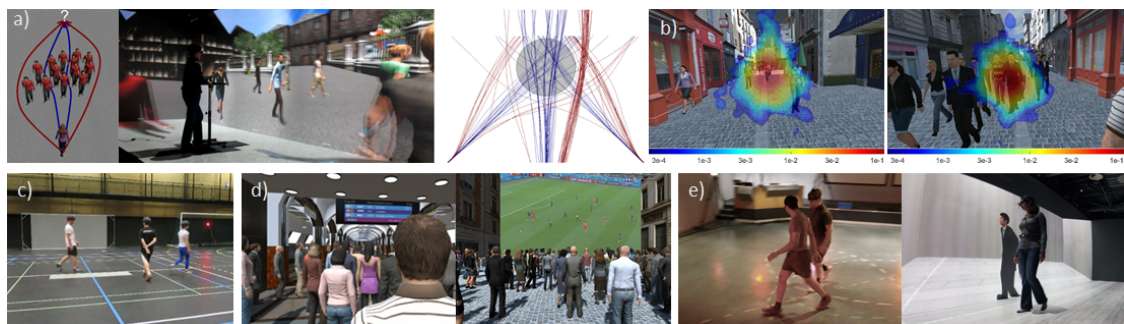


FIGURE 2.40 – En addition des études présentées ci-après, nous avons exploré l'effet des facteurs situationnels et individuels en considérant l'effet de la densité sur les stratégies d'évitement de collision (a) et l'activité du regard (b), la question du traitement séquentiel ou simultané des interactions quand on passe à une situation impliquant l'évitement non plus de un mais de deux marcheurs (c). Nous avons aussi évalué l'effet du contexte social dans lequel se déroule l'interaction (d) et l'effet des émotions sur les métriques de l'interaction entre deux marcheurs (e).

travaux détaillés dans les sections suivantes, notons que nous nous sommes également intéressés à la question des facteurs situationnels en considérant l'effet de la densité sur les stratégies d'évitement de collision (BRUNEAU, OLIVIER et PETTRE, 2015) (contourner ou passer à travers un groupe de marcheurs, cf figure 2.40a) et l'activité du regard (BERTON et al., 2020, figure 2.40b), ainsi que le caractère simultané ou séquentiel de l'évitement de 3 marcheurs en comparaison à 2 (MEERHOFF et al., 2018a, figure 2.40c). En collaboration avec des sociologues de l'Université Rennes 2, nous avons

également étudié l'effet du contexte social de l'interaction en considérant une tâche d'invasion de l'espace personnel en réel et en virtuel dans une gare ou à proximité d'un événement sportif (figure 2.40d). Enfin, sur la question des facteurs individuels, nous nous sommes intéressés à l'effet des émotions en considérant deux individus marchant côte à côte, montrant que non seulement l'état émotionnel du marcheur mais également de l'autre marcheur avec qui il interagit influence les métriques de l'interaction (PERRINET, OLIVIER et PETTRÉ, 2013, figure 2.40e).

2.5.1 Facteurs situationnels

Risque de collision et voisinage d'interaction

Si on souhaite étendre l'analyse des interactions entre marcheurs à des situations plus complexes, il est nécessaire de considérer des cas d'études pour lesquels la tâche du marcheur n'est pas seulement d'éviter une collision avec un seul autre marcheur mais plutôt de se déplacer dans une foule. A l'image des mouvements collectifs des animaux (COUZIN, KRAUSE et al., 2003), le mouvement d'une foule de marcheurs émerge de la combinaison d'interactions locales entre marcheurs voisins (MOUSSAÏD et al., 2012). On peut ainsi parler de voisinage d'interaction, défini comme la formalisation des voisins qui sont susceptibles d'influencer la trajectoire d'un marcheur donné. Alors que la question des interactions locales entre marcheurs a déjà été abordée dans la littérature, que ce soit dans une tâche d'évitement de collision comme nous avons pu le voir dans les sections précédentes, ou encore dans une tâche de suivi (LEMERCIER et al., 2012; RIO, RHEA et WARREN, 2014) ou de marche en groupe (MOUSSAÏD et al., 2010; RIO, DACHNER et WARREN, 2018), l'identification du voisinage d'interaction demeure encore une question ouverte. Cette tâche n'est pas aisée car étant donné le grand nombre de sources d'interactions potentielles, inférer une causalité sur la base de la combinaison des interactions est pour ainsi dire impossible, d'autant plus si on ne se réfère qu'à la cinématique des marcheurs. On peut néanmoins faire l'hypothèse qu'une variable importante dans l'étude du voisinage d'interaction est la notion du risque de collision. La notion de risque de collision peut être exprimée sous la forme de métriques liées à une notion de distance, comme la distance future de croisement (*mpd*, OLIVIER et al.,

2012) ou encore une notion de temps, comme le temps restant avant le croisement (*TtCA*, DUTRA et al., 2017). Il nous a alors semblé intéressant de coupler ces deux variables de distance et de temps afin de fournir une description complète des conditions de la situation d'interaction entre marcheurs pour aborder la notion de voisinage d'interaction. En effet, il se peut que *TtCA* soit faible mais que *mpd* soit suffisamment grande pour ne pas nécessiter d'adaptation de mouvement pour que les marcheurs se croisent à une distance confortable. Il se peut également que *mpd* soit faible mais que *TtCA* soit suffisamment grand pour ne pas avoir besoin de déclencher une adaptation de mouvement immédiate étant donnée l'incertitude des événements qui peuvent survenir durant ce laps de temps. En parallèle à cette question de risque de collision, nous pensons que les données issues de l'activité du regard permettraient de fournir des informations additionnelles précieuses puisqu'elles peuvent renseigner sur les endroits où les marcheurs prennent des indices visuels pour le contrôle de leur locomotion. Nous avons déjà présenté dans la section 2.4.4 différentes études ayant considéré l'activité du regard durant la locomotion et les interactions entre marcheurs. En particulier, le comportement du regard est influencé par le risque de collision, puisqu'un marcheur sur un chemin de collision est plus regardé qu'un marcheur qui ne présente pas de risque de collision (JOVANCEVIC-MISIC et HAYHOE, 2009). Notons que la notion du risque de collision a été explorée de manière globale puisqu'elle correspondait à la situation où un individu arrivait face à l'observateur et sur le même couloir de marche que ce dernier. On peut néanmoins supposer que l'activité du regard mette en avant les marcheurs qui inciteraient la mise en place de manœuvres d'évitement de collision lorsqu'un individu se déplace dans une foule.

Nous avons ainsi proposé une étude (MEERHOFF et al., 2018b), dans le cadre du post-doctorat de Rens Meerhoff financé par la bourse SAD Interact de la région Bretagne et dans le cadre du projet ANR Percolation, qui cherchait à mettre en évidence que l'activité du regard guide l'interaction entre marcheurs et pourrait être un bon indicateur pour renseigner sur le voisinage d'interaction. Deux hypothèses ont ainsi motivé notre étude :

- H1 : lorsqu'un marcheur se déplace dans une foule, son regard est attiré vers les marcheurs qui présentent un risque de collision.

- H2 : les marcheurs regardés sont ceux pour lesquels une manœuvre d'évitement de collision est effectuée.

Afin de répondre à ces hypothèses, nous avons mis en place une expérimentation impliquant 19 participants (6 femmes et 13 hommes) âgés de 25 (± 4 ans). Assis face à un écran d'ordinateur, il s'agissait de se déplacer dans un environnement virtuel peuplé, au moyen d'un joystick afin de rejoindre une cible lumineuse distante tout en évitant une collision avec les marcheurs virtuels (cf figures 2.41 a et b). La fonction de transfert utilisée était la fonction **A+R** présentée dans la section 2.4.3. Un oculomètre de marque Eye Tribe (60Hz) était disposé sous l'écran. L'utilisation de l'environnement virtuel permettait d'avoir un contrôle fort sur les caractéristiques des marcheurs composant la foule au sein de laquelle les participants devaient naviguer. Les marcheurs virtuels étaient uniformes en terme d'apparence visuelle (forme et couleur). Ils se déplaçaient en ligne droite à vitesse constante (1.33m/s) et étaient dotés d'un comportement d'évitement de collision, basé sur l'algorithme RVO2 (VAN DEN BERG et al., 2011). Nous avons initialisé les paramètres de telle sorte que les marcheurs virtuels mettent en place un évitement de collision tardif, afin de permettre que l'évitement de collision soit activement réalisé par le participant, tout en évitant des possibles contacts qui pourraient perturber ce dernier. Après avoir réalisé deux essais d'entraînement, les participants réalisaient deux essais inclus dans l'analyse, chaque essai durant 2 minutes. Un dernier essai était réalisé en fin de séance pour contrôler la qualité de nos données oculométriques. Les participants étaient alors déplacés passivement dans l'environnement virtuel. La consigne donnée était de regarder un marcheur de couleur rouge dans la scène parmi les autres marcheurs virtuels. On s'assurait ainsi de la précision des données en évaluant la correspondance entre la direction du regard et la position du marcheur de couleur rouge.

En utilisant les données de l'oculomètre et les trajectoires des participants et des marcheurs virtuels, nous avons analysé le lien entre les marcheurs virtuels regardés, les marcheurs virtuels évités et le risque de collision attribué à chacun d'entre eux. Pour cela, nous avons proposé de caractériser le risque de collision comme une combinaison

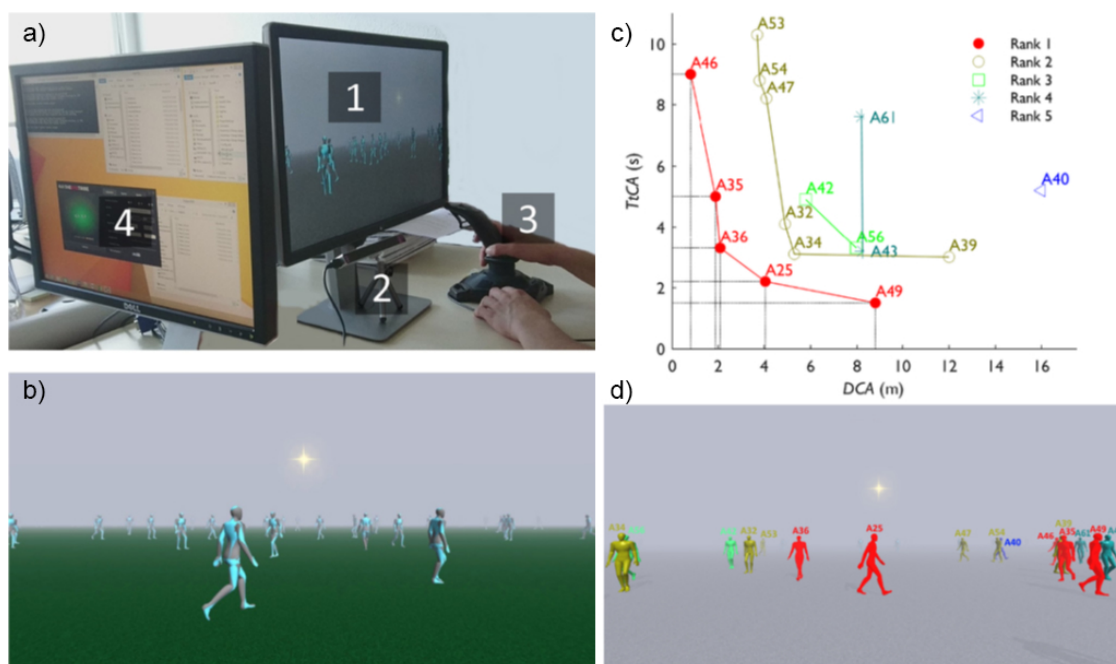


FIGURE 2.41 – a-b) Pour étudier le lien entre l’activité du regard, les manœuvres d’évitement de collision et le risque de collision, nous avons développé une étude où des participants assis face à un écran d’ordinateur sous lequel était disposé un oculomètre, devaient se déplacer dans un environnement virtuel peuplé au moyen d’un joystick afin d’atteindre une cible lumineuse distante. c-d) En utilisant la méthode des fronts de Pareto, nous avons classé à chaque instant chaque marcheurs virtuel en catégories de risque de collision basées sur une combinaison de la distance future de croisement (DCA) et le temps restant avant le croisement ($TtCA$).

des métriques de distance et de temps en utilisant la méthode des fronts de Pareto (KELLER, 2017). Elle a permis de classer les interactions entre le participant et chaque marcheur virtuel sur la base de la combinaison entre les valeurs de $TtCA$ et mpd , que nous nommerons DCA (Distance of Closest Approach) pour la suite de cette sous-section dans un souci de cohérence avec le temps qui lui est associé. Ceci permet de rendre compte du risque de collision, le plus fort risque de collision étant associé aux combinaisons des plus petites valeurs de DCA et $TtCA$ sans procéder à des hypothèses arbitraires sur la manière dont ces deux variables sont associées. Un exemple de ce classement est illustré sur les figures 2.41 c et d. Dans cette configuration, on remarque que les marcheurs visibles ont été classés en 5 fronts. En rouge sont ainsi représentés les marcheurs qui à cet instant particulier à l’écran représentent le plus fort risque de collision avec le participant. Plus la valeur du rang augmente, moins le risque de collision est élevé. Pour chaque front de Pareto, nous avons calculé la durée des fixations sur les marcheurs virtuels ainsi qu’une

fréquence relative de fixation (RFF) pour éviter tout biais dans nos interprétations. En effet, la fréquence de fixation dépend du nombre de marcheurs virtuels appartenant à chaque front. RFF est alors calculée comme le ratio entre le nombre de fixation mesurées et le nombre de fixations théorique dans chaque front. Le nombre de fixations théorique est déterminé en considérant à chaque instant le nombre de marcheurs par front multiplié par le nombre total de fixations. Si le participant regarde aléatoirement les marcheurs durant l'essai, alors RFF sera égal à 1. Une valeur égale à 2 signifie que le participant a regardé les marcheurs d'un rang deux fois plus souvent que la valeur attendue aléatoirement. Nous nous sommes également intéressés aux manœuvres d'évitement de collision réalisées par les participants. Le début et la fin des manœuvres ont été définies en identifiant les actions du participant sur le joystick (pour rappel, une adaptation du mouvement était réalisée lorsque le participant agissait sur le joystick en modifiant la vitesse sur l'axe longitudinal, ou l'orientation sur l'axe latéral), en considérant les séquences d'action d'au moins 10 images (0.17s). Les marcheurs évités ont été définis comme ceux pour qui les valeurs de *DCA* étaient augmentées entre le début et la fin de la manœuvre d'évitement de collision. Enfin, nous avons mis en relation l'évitement de collision avec les fixations afin d'identifier le front sur lequel se situent les marcheurs fixés juste avant l'initiation de l'évitement, la durée de la fixation précédant l'évitement et le temps passé entre la dernière fixation et l'initiation de l'évitement.

Les résultats de l'analyse sont présentés sur la figure 2.42 pour 17 participants, puisque les données oculométriques de deux participants n'étaient pas de qualité suffisante. Nos résultats ont tout d'abord révélé que la plupart des fixations du regard étaient dirigées vers les marcheurs virtuels présentant le plus grand risque de collision avec le participant (figure 2.42a), ce qui valide notre hypothèse H1. Même en corrigeant la fréquence de fixation en tenant compte du nombre de marcheur par front de Pareto, les marcheurs virtuels du front de Pareto 1, c'est-à-dire présentant le plus fort risque de collision avec le participant, ont été regardés 2.3 fois plus souvent que la fréquence théorique correspondant à des fixations aléatoires. De même, la durée moyenne de fixation était nettement plus élevée pour les marcheurs du front de Pareto 1 par rapport aux marcheurs des autres

fronts (sauf pour le rang 9, mais il n'avait que 3 fixations figure 2.42b). Ces résultats sont conformes à l'étude de Jovancevic et Hayhoe (2009) où les participants, marchant dans un ovale contraint, regardaient plus longtemps (également plus tôt) les piétons potentiellement dangereux, marchant sur un chemin de collision avec l'observateur. Il a par ailleurs été montré dans des environnements statiques que les marcheurs fixent leur regard sur des endroits qui maximisent l'information pouvant être intégrée par le système nerveux pour assurer un placement des pieds en toute sécurité (MARIGOLD et PATLA, 2007). Nous suggérons ainsi que le risque de collision est saillant et influence le comportement du regard des participants. On peut alors faire un lien avec l'étude de Andersen et Kim (2001) qui a montré que les observateurs peuvent détecter avec précision les collisions à venir.

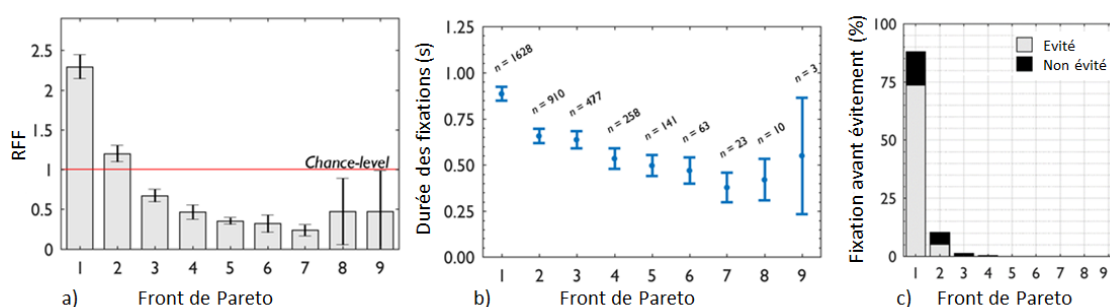


FIGURE 2.42 – a) Fréquence relative de fixation (RFF) moyenne (en % $\pm$ IC 95%) par sujet ($n = 17$) selon le front de Pareto déterminé sur une combinaison de *DCA* et *TICA*. Les valeurs observées au-dessus de 1 indiquent que le nombre de fixation est supérieur à celui attendu par chance. b) Durée moyenne de fixation d'un marcheur (en s $\pm$ IC 95%) pour chaque front de Pareto. Le nombre de fixations par rang est spécifié par la valeur de n . c) Pourcentage de marcheurs fixés juste avant l'initiation d'une manœuvre d'évitement de collision catégorisé selon que la valeur de *DCA* avec ce marcheur augmente (le marcheur est évité), ou non (le marcheur n'est pas évité).

Nous avons par ailleurs vérifié l'existence d'une relation entre les comportements du regard et les manœuvres d'évitement. Un total de 997 manœuvres a été enregistré. Parmi ces manœuvres, 493 ont été classées comme manœuvres d'évitement de collision. En examinant spécifiquement les fixations avant que le participant initie une manœuvre d'évitement, il ressort que sur l'ensemble des essais 79% des marcheurs fixés ont été évités ce qui va dans le sens de notre hypothèse H2. Ces résultats nous amènent ainsi à penser dans un premier temps que le dernier marcheur fixé est probablement celui

qui a déclenché une manœuvre d'évitement. En revanche, dans 21% des manœuvres d'évitement, le dernier marcheur fixé n'a pas été évité. Cela pourrait être dû à notre définition du terme "évité" (c'est-à-dire une augmentation de la *DCA* à la fin par rapport au début d'une manœuvre d'évitement). Il est également possible que la fixation qui a réellement déclenché l'évitement n'ait pas été suffisamment longue pour être incluse comme fixation (seules les fixations de plus de 0,2 s avaient été prises en compte). Croft et Panchuk (2017) ont également fait état d'un évitement de collision sans fixation, qui peut être mis en lien avec la vision parafovéale. La vision parafovéale, qui n'est généralement pas enregistrée comme une fixation peut effectivement permettre des ajustements de trajectoire. Il est également possible que ces marcheurs virtuels aient été évités sans être regardés à la suite d'un ajustement à l'un des autres marcheurs virtuels. Non seulement le dernier marcheur virtuel fixé a effectivement été évité la plupart du temps, mais ce dernier marcheur virtuel évité appartenait également au premier rang de Pareto dans la plupart des cas. Comme le montre la figure 2.42c), la quasi-totalité des marcheurs virtuels fixés appartient aux rangs 1 et 2 du front de Pareto.

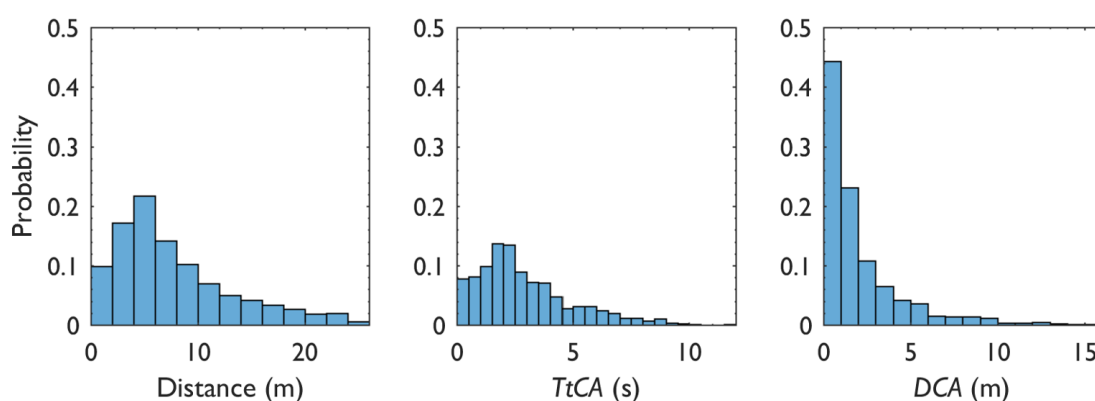


FIGURE 2.43 – Fréquence de distribution normalisée des fixations avant une manœuvre d'évitement en fonction de la distance au marcheur fixé (gauche), *TtCA* (milieu), et *DCA* (droite). La distribution est normalisée entre 0 et 1, de telle sorte que la somme de toutes les observations dans chaque intervalle soit égale à 1.

Les histogrammes de la figure 2.43 illustrent la distribution des fixations en fonction des valeurs isolées de distance *TtCA* et *DCA* juste avant l'initiation de l'évitement. Ils révèlent que le marcheur qui a déclenché une réaction n'est pas si bien décrit uniquement

en fonction d'un seul de ces paramètres, même si *DCA* semble être un critère important pour déterminer quels marcheurs peuvent provoquer une manœuvre d'évitement. Nous pensons ainsi que la combinaison des mesures basées sur la distance et le temps (*DCA* et *TtCA*) à l'aide d'un classement de Pareto permet une catégorisation significative du risque de collision. L'avantage du classement de Pareto est qu'il n'est pas nécessaire de faire des hypothèses sur l'importance relative de la *DCA* et de la *TtCA* en ce qui concerne le risque de collision. Toutefois, l'un des inconvénients de cette technique est que plusieurs marcheurs auront le même rang.

Alors que des études précédentes ont montré l'importance de l'information visuelle dans le contrôle de la locomotion (PATLA, 1997; WARREN, 1998) et la relation entre le comportement du regard et les ajustements de la trajectoire d'un autre marcheur (CROFT et PANCHUK, 2017), notre étude a montré que l'analyse combinée des données de regard et de trajectoire apporte de nouvelles perspectives sur l'exploration du voisinage d'interaction lorsqu'un individu se déplace dans un environnement encombré. L'activité du regard est clairement orientée pour servir cette tâche et permet de renseigner sur les facteurs situationnels liés au risque de collision. Elle nous semble être ainsi une variable de grand intérêt pour comprendre la manière dont les marcheurs sélectionnent leurs interactions. Ces informations ont de nombreuses applications, telles que la conception d'algorithmes de simulation de foule, dont l'importance est aujourd'hui cruciale pour l'urbanisme, la sécurité et l'architecture. Nos travaux ouvrent plusieurs pistes de recherche. L'une d'entre elles consiste à mieux comprendre ce qui rend le risque de collision important dans des situations complexes, comme la navigation dans une foule de piétons. On peut ainsi envisager de fournir une définition plus précise du risque de collision en exploitant la relation entre l'évitement de collision et le regard pour mieux comprendre les composantes temporelles et spatiales qui sous-tendent le risque de collision. Les recherches futures pourraient également affiner la définition du marcheur qui a déclenché une manœuvre d'évitement. Dans le cas de l'étude du voisinage d'interaction, on pourrait étudier l'influence des n derniers marcheurs qui ont été fixés. L'utilisation spécifique de

méthodes plus écologiques, telles que la reproduction de cette tâche avec un casque de réalité virtuelle comme nous avons pu l'illustrer dans la section 2.4 semble alors pertinente.

Effet de la nature de la trajectoire de l'interacteur.

Cette section va poursuivre la présentation d'une partie des études menées sur la question de l'influence des facteurs situationnels en considérant la nature de la trajectoire de l'obstacle à éviter. Jusqu'à présent, les études menées pour analyser les interactions entre un marcheur et les obstacles mobiles de l'environnement ont principalement considéré des trajectoires passives, la personne ou l'obstacle à éviter se déplaçant en ligne droite à vitesse de confort (BASILI et al., 2013; BERTON et al., 2019; GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005; HUBER et al., 2014). On comprend bien l'intérêt d'utiliser un tel comportement dans un cadre expérimental afin de standardiser au maximum les conditions. Pourtant, si on cherche à se rapprocher au plus près des conditions réelles, le caractère réactif de l'obstacle avec lequel le marcheur interagit semble fondamental. Quelques études ont néanmoins utilisé des paradigmes où deux marcheurs réactifs étaient impliqués (KNORR et al., 2016; OLIVIER et al., 2012, 2013) mais la comparaison entre ces deux comportements n'a pas été effectuée. Dans le contexte des applications d'interaction homme-robot, nous présenterons ainsi dans un premier temps nos travaux sur l'effet du caractère passif ou réactif de la trajectoire d'un robot mobile sur la tâche d'évitement de collision réalisé par un marcheur. Dans un second temps, nous présenterons une autre étude qui a considéré la situation d'interaction avec un marcheur sur une trajectoire courbe. En effet, toutes les études menées à ce jour dans le cadre de l'évitement de collision entre deux marcheurs ont considéré le cas de trajectoires rectilignes entre le point de départ et d'arrivée des marcheurs. Pourtant, la marche en courbe fait partie des synergies motrices de bases de la locomotion et la question de la validité de nos modèles de *mpd* qui se basent sur une extrapolation linéaire des états courants peut être remise en question.

Evitement de collision avec un robot mobile : trajectoire passive vs. réactive

Les robots et les humains devront partager le même environnement dans un avenir proche (GOODRICH et SCHULTZ, 2008 ; KRUSE et al., 2013). À cette fin, les roboticiens doivent garantir des interactions sûres entre les robots et les humains lors des tâches de locomotion. Les études que nous avons pu décrire dans les sections précédentes convergent toutes vers la conclusion que le marcheur est capable d'estimer avec précision la situation d'interaction de croisement avec un autre marcheur (ordre de passage, risque de collision, adaptations). Les études ayant considéré l'interaction humains-robots ont quant à elles démontré qu'il est plus facile de comprendre et de prédire le comportement des robots s'ils sont semblables à ceux réalisés par des humains (CARTON et al., 2013 ; LICHTENTHÄLER et KIRSCH, 2013). Dans ce sens, la trajectoire du robot peut être "lue" et comprise par un individu dans une tâche où un robot se déplace vers ce dernier pour initier une conversation basée sur une approche liée aux distances publiques et sociales (SATAKE et al., 2009). De plus, dans une tâche de face à face avec un robot en mouvement, les humains se comportent de manière similaire, qu'on leur dise ou non quelle sera la trajectoire du robot (CARTON, OLSZOWY et WOLLHERR, 2016), montrant leur capacité à lire le mouvement de ce dernier. Certaines études ont par ailleurs mis en avant que les comportements humains (DRAGAN et al., 2015 ; KATO, KANDA et ISHIGURO, 2015) améliorent à plusieurs niveaux les performances de la collaboration entre l'homme et le robot. Néanmoins, l'avantage de faire se déplacer un robot mobile comme un humain, notamment dans sa manière d'éviter les collisions n'a pas encore été démontré.

Dans ce cadre, nous nous sommes interrogés sur l'influence du caractère passif ou réactif de la trajectoire d'un robot sur le comportement d'évitement de collision d'un marcheur qu'il croise. Ce projet a été réalisé en collaboration avec le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) à Toulouse. Nous avons développé deux études successives de croisement entre un marcheur et un robot mobile. La première étude a considéré le cas d'un robot mobile passif (VASSALLO et al., 2017) tandis que la seconde

a considéré le cas d'un robot mobile réactif (VASSALLO et al., 2018). Une illustration du dispositif expérimental commun aux deux études est présenté sur la figure 2.44.

L'expérimentation s'est déroulée dans un gymnase de 25×40 m. Le gymnase était séparé en deux parties par des panneaux occultants de 2 m de haut, formant une porte au milieu. Un système de capture de mouvement (Vicon) disposé tout autour du gymnase permettait d'enregistrer la position du participant (définie comme le milieu de ses épaules) et la position du robot (point central de sa base). La tâche du participant était, à partir d'une position de départ (PSP), de rejoindre une position d'arrivée (PT) tout en évitant une collision avec le robot mobile qui venait soit de la droite (RSP1) soit de la gauche (RSP2) du participant. À l'image de nos études précédentes sur les croisements de piétons, nous avons disposé des panneaux occultants dans la zone expérimentale afin que le participant ne voit pas le robot avant d'atteindre une vitesse de confort. Il devait donc passer à travers une porte avant de pouvoir voir le robot. Nous avons utilisé le robot RobuLAB10 de la société Robosoft (dimensions : $0,45 \times 0,40 \times 1,42$ m, masse 25 kg, vitesse maximale 3 m/s).

Dans la première étude, nous avons programmé le robot pour qu'il exécute une trajectoire rectiligne entre RSP1 et RSP2 à vitesse constante (1,4 m/s). Le point d'intersection entre la trajectoire du robot [RSP1, RSP2] et le chemin des participants [PSP, PT] est appelé Point de croisement théorique (HCP). Il est calculé en supposant qu'il n'y ait pas d'adaptation de la trajectoire des participants. Le robot a alors été commandé pour générer des interactions spécifiques avec le participant. En particulier, le robot était soit : a) sur une trajectoire de collision complète (atteindre HCP en même temps que le participant), b) sur une trajectoire de collision partielle (le robot atteint HCP légèrement avant ou après le participant), ou c) pas sur une trajectoire de collision. À cette fin, nous avons mesuré la vitesse du participant dans la zone d'estimation de mouvement (MEZ), avant le passage des panneaux occultants, et estimé le temps nécessaire pour que le participant atteigne HCP. Nous avons ainsi déduit le temps auquel le robot doit atteindre HCP et l'avons modulé par un décalage temporel, choisi au hasard dans la gamme $[-0.6, 0.6]$ s, de telle sorte à faire varier l'ordre de passage et le risque de collision. 7 participants (1 femme, 6

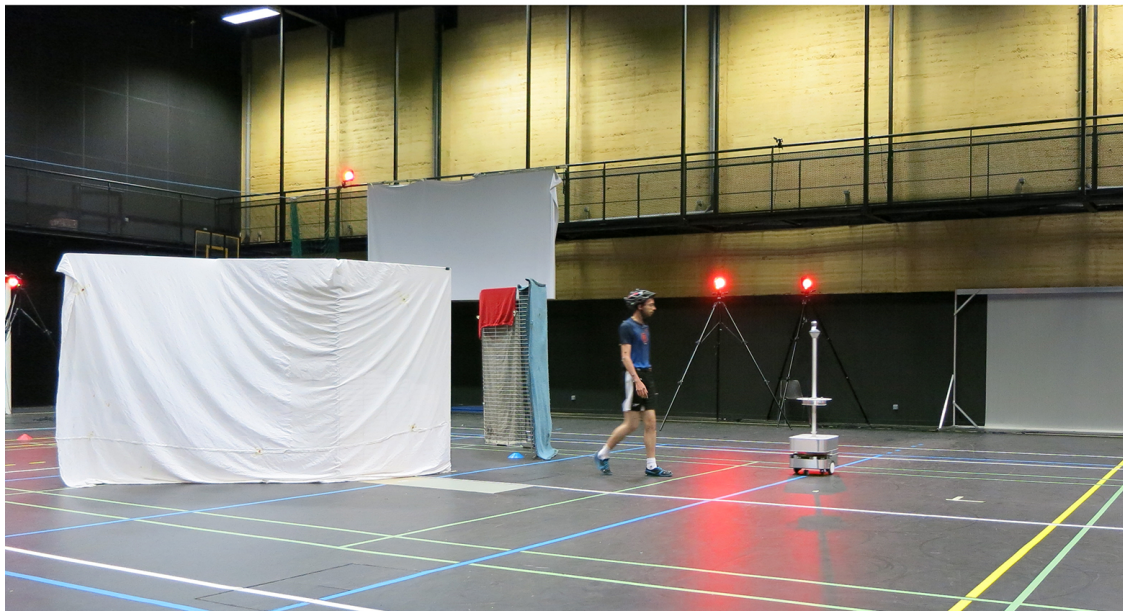
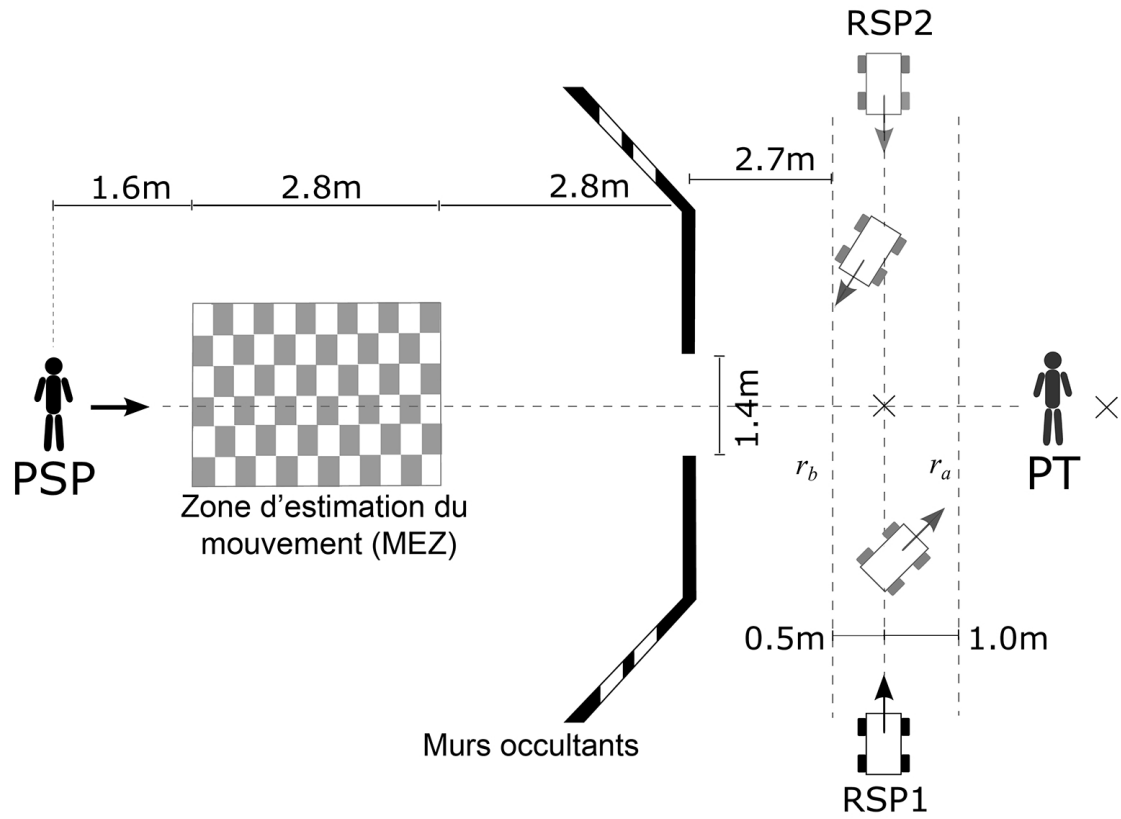


FIGURE 2.44 – Dispositif expérimental pour l'étude des interactions entre un marcheur et un robot mobile.

hommes, 26.1 ± 5.4 ans) ont alors effectué 40 essais chacun. La position de départ du robot (50% RSP1, 50% RSP2) a été randomisée parmi les essais. Pour introduire un peu d'incertitude, pour quatre essais, le robot n'a pas bougé. Les participants n'ont pas été informés de la position initiale du robot ni de la possibilité que le robot pouvait ne pas se déplacer. Seuls les 36 essais présentant des adaptations potentielles ont été analysés.

Dans la seconde étude, nous avons programmé le robot de telle sorte que le robot puisse réagir au mouvement du participant. La séquence de commande du robot était la suivante : 1) Le robot était au repos à RSP1 ou RSP2. 2) Le temps nécessaire pour que le participant atteigne HCP a été estimé dans la MEZ. 3) La vitesse théorique à laquelle le robot devait se déplacer pour atteindre HCP en même temps que le participant a été estimée. Cette vitesse a ensuite été augmentée ou diminuée pour que le robot arrive à l'avance ou après le participant à HCP, afin de moduler l'ordre de passage et le risque de collision choisi au hasard dans la gamme $[-0.9, 0.9]$ m. 4) Lorsque le robot mettait en place une manœuvre d'évitement de collision, 2 m avant d'atteindre HCP, il adaptait sa trajectoire en y insérant un nouveau point de passage, afin de passer derrière le marcheur le long de la ligne r_a (cf figure 2.44) ou devant le marcheur en se déplaçant le long de la ligne r_b , selon l'ordre de passage souhaité. 5) Une fois la phase d'évitement terminée, le robot rejoignait sa position finale. 10 participants (2 femmes, 8 hommes, 28.8 ± 9.5 ans) ont alors effectué 30 essais chacun. Comme pour l'étude 1, la position de départ du robot (50% RSP1, 50% RSP2) a été randomisée et pour deux essais le robot n'a pas bougé. Seuls les 28 essais présentant des adaptations potentielles ont été analysés.

Pour les deux études, nous avons proposé une version signée de *mpd*, notée *smpd* afin de pouvoir analyser en plus de la distance future de croisement l'ordre de passage du participant par rapport au robot et ses possibles inversions. *smpd* était alors négative si le participant était sensé passer en seconde position au croisement et positive s'il était sensé passer premier. Nous avons réalisé nos analyses en considérant la phase d'interaction normalisée, entre le moment où le marcheur peut voir le robot (*tsee*) et le moment du croisement (*tcross*).

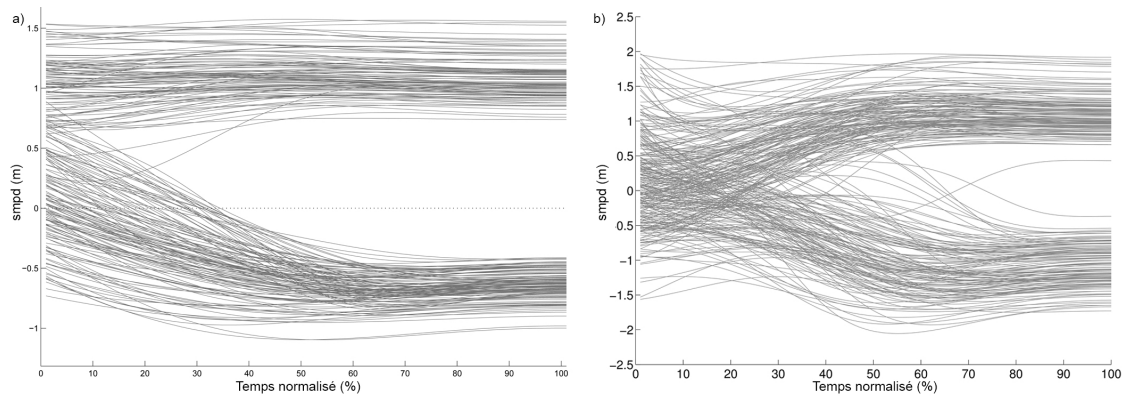


FIGURE 2.45 – Evolution de $smpd$ durant la phase d’interaction entre un marcheur et un robot passif (a) et réactif (b). $smpd$ est négative lorsque le marcheur est sensé passé second au croisement et positive lorsqu’il est sensé passer premier.

La figure 2.45 illustre l’évolution de $smpd$ durant la phase d’interaction dans le cas du robot passif (a) et réactif (b). Notons tout d’abord qu’aucune collision n’a eu lieu entre le robot et le marcheur. Sur la base du signe de $smpd$ à t_{see} et t_{cross} , nous pouvons identifier 4 catégories d’essais : 1) PosPos : le marcheur est sensé passer premier au début de l’interaction et le reste jusqu’à la fin ; 2) NegNeg : le marcheur est sensé passer second au début de l’interaction et le reste jusqu’à la fin ; 3) PosNeg : le marcheur est sensé passer premier au début de l’interaction et passe second au croisement ; 4) NegPos : le marcheur est sensé passer second au début de l’interaction et passe premier au croisement. Les cas PosNeg et NegPos correspondent à des essais où l’ordre de passage initial a été inversé. Le tableau 2.1 rapporte ainsi la distribution des essais réalisés dans les deux études dans ces 4 catégories.

TABLE 2.1 – Répartition des essais pour l’étude de croisement avec un robot passif et réactif selon l’ordre de passage initial et final des marcheurs.

	PosPos	NegNeg	PosNeg	NegPos
Robot passif	43%	28%	29%	0%
Robot réactif	52%	32%	8%	1%

La différence notable que nous pouvons relever entre le cas d’interaction avec un robot mobile passif et un robot mobile réactif est la proportion du nombre d’inversion d’ordre de passage ainsi que le seuil de $smpd(t_{see})$ à partir duquel on observe ces inversions. En effet, dans 29% des cas, les marcheurs étaient en avance sur le robot mobile passif

mais l'ont finalement laissé passer premier contre 8% des cas pour l'interaction avec un robot mobile réactif. Un tel comportement dans le cas du robot réactif a été observé lorsque $smpd(tsee)$ se situait autour de 0.39m. Au-delà de ce seuil, les participants ont préféré conserver leur rôle plutôt que de céder la place au robot. Ce résultat est confirmé par la répartition en catégories PosPos et PosNeg des trajectoires à partir de l'intervalle $smpd$ [0.39m, 0.74m], où 94% des essais appartiennent au groupe PosPos. Ce résultat contraste avec celui observé avec le robot passif, où les participants ont constamment préféré céder la place au robot lorsque le risque de collision était inférieur à 0.81 m, même si ce choix n'était pas optimal. Notons également que nous n'avons pas ou peu observé (seulement 3 essais dans l'étude 2) de cas où les marcheurs étaient en retard sur le robot et ont modifié leur trajectoire de telle sorte à passer premier.

Il est à noter, qu'il y ait eu ou non inversion de l'ordre de passage et que le robot ait été passif ou réactif, que les trajectoires ont été adaptées afin d'augmenter la distance de passage entre l'homme et le robot pour réduire le risque de collision. Ces adaptations sont caractérisées par deux phases principales, la première correspondant à la phase de réaction, où $smpd$ est augmentée, et une seconde correspondant à la phase de régulation, où $smpd$ est maintenue constante. Ces résultats sont en accord avec nos travaux précédents lors d'interactions marcheur-marcheur mettant en avant le fait que la tâche d'évitement de collision est résolue en avance. Notons que lorsque le participant décide de préserver l'ordre de passage, la tâche est résolue plus tôt que lorsqu'un changement de rôles se produit car cela nécessite une plus grande adaptation des mouvements. Le fait que nous n'ayons pas mesuré de phase d'observation dans l'évolution de $smpd$ peut venir du fait que les valeurs de $TtCA$ au moment où le marcheur était en mesure de voir le robot étaient plus petites que celles observées dans le protocole de croisement entre deux marcheurs de part la taille de la zone expérimentale. Des travaux supplémentaires seraient intéressants à mener pour évaluer si dans les mêmes conditions de distance initiale, nous retrouvons ou pas cette phase d'observation. En effet, il se peut que la perception du risque de collision soit plus forte dans le cas d'interaction avec le robot mobile, incitant le participant à adapter plus tôt sa trajectoire locomotrice.

Quels facteurs peuvent expliquer une telle inversion des rôles, i.e. matérialisée par des inversions de l'ordre de passage, dans le cas du robot mobile passif ? Nous pouvons avancer que le changement de rôle dans l'ordre de passage est inefficace : d'un point de vue énergétique, cela demande plus d'effort puisque la modification de la trajectoire est plus grande. Nous interprétons l'inversion des rôles comme un extrême dans l'adaptation de mouvement pour préserver l'espace personnel, directement lié au risque de collision perçu. Passer devant le robot pourrait être perçu comme plus dangereux : les participants de cette étude n'ont pas d'expérience passée d'interaction avec un système autonome et le risque de se blesser en cas de contact est plus élevé qu'avec un autre marcheur : visuellement le robot semble assez lourd, métallique et compact. Entrer en collision avec lui pourrait certainement blesser le marcheur aux jambes, ce qui rend raisonnable l'idée que les participants préfèrent adopter un comportement plus sûr. Néanmoins cette hypothèse de risque perçu liée à la présence du robot est contrebalancée par le fait que nous n'observons pas une si grande proportion d'inversion dans le cas du robot mobile réactif. Il semble ainsi que la nature de la trajectoire influence de façon majeure le comportement d'évitement de collision des marcheurs. La nature des attentes et des présupposés du marcheur, qui peuvent être liés à la notion de navigation sociale (RIOS-MARTINEZ, SPALANZANI et LAUGIER, 2015), doivent avoir une forte influence sur le comportement du marcheur. Les similitudes de comportement observées entre marcheur-marcheur et marcheur-robot réactif sont conformes à l'étude de Carton et al. (2016), dans laquelle un marcheur évite un robot qui reproduit le comportement moyen d'un homme pour éviter une collision face à face. Le fait de donner un comportement humain à un robot en mouvement donnerait lieu à des mouvements lisibles qui traduisent des intentions. Cette lisibilité permettrait aux humains de minimiser leur effort de planification et éviter la collision plus tôt et de manière plus fluide. Conformément aux études précédentes (CARTON, OLSZOWY et WOLLHERR, 2016 ; DRAGAN et al., 2015 ; LICHTENTHÄLER et KIRSCH, 2013), nos résultats montrent ainsi que le fait de contrôler les robots afin de les faire se comporter de manière humaine est un point clé pour faciliter la cohabitation entre l'homme et le robot. Ceci pose également des questions sur le développement d'études prenant en compte la réactivité de l'obstacle afin de tenir compte de toutes les dimensions

de la question de l'interaction entre son marcheur et son environnement.

Trajectoire rectiligne vs. trajectoire courbe

Après avoir exploré l'effet de la nature de la trajectoire de l'obstacle à éviter au travers son caractère passif et réactif, nous allons à présent nous intéresser au fait que la trajectoire du marcheur à éviter ne soit plus rectiligne mais curviligne. En effet, les travaux de la littérature, incluant les nôtres, ont exclusivement considéré l'évitement de collision entre deux marcheurs ayant des trajectoires rectilignes entre leur point de départ et leur but à atteindre. En particulier, nous avons utilisé la métrique *mpd* pour analyser les interactions en faisant l'hypothèse d'une extrapolation linéaire des états courants pour décrire les positions relatives futures des marcheurs. Cependant, en conditions réelles, les marcheurs ne suivent pas toujours des trajectoires rectilignes. Cela soulève alors deux questions : 1) Une collision avec un marcheur sur une trajectoire curviligne est-elle aussi bien résolue qu'une collision avec un marcheur sur une trajectoire rectiligne ? 2) La variable *mpd* peut-elle être utilisée pour décrire une telle interaction lors de trajectoires curvilignes ? Nous avons cherché à répondre à ces questions dans le cadre de la thèse de Sean Lynch (LYNCH et al., 2019, 2020).

Il a été démontré que le système visuel est sensible aux changements de direction du mouvement propre et du mouvement des objets à la fois pour des trajectoires rectilignes et curvilignes lors de tâches d'interception (BASTIN, CRAIG et MONTAGNE, 2006 ; BASTIN et al., 2008 ; BOSCO, DELLE MONACHE et LACQUANITI, 2012 ; DELLE MONACHE, LACQUANITI et BOSCO, 2015). Il a été également mis en avant que le système visuel est sensible à la vitesse mais plutôt insensible à l'accélération (WATAMANIUK et HEINEN, 2003 ; ZAAL et al., 2012). Des résultats précédents ont fait état de performance plus faible dans des tâches de jugement de temps restant avant la collision en cas de vitesse non constante (i.e., accélération constante) qu'en cas de vitesse constante (BENGUIGUI, RIPOLL et BRODERICK, 2003 ; BENNETT et BENGUIGUI, 2013, 2016). On peut ainsi faire référence à l'étude en réalité virtuelle de Bastin et al. (2006) qui a montré que la

cinématique d'un marcheur était différente lorsque ce dernier devait intercepter une balle se déplaçant sur une trajectoire rectiligne ou sur un arc de cercle (rayon 5 ou 10m sur le plan horizontal). Néanmoins, la stratégie commune consistait à contrôler de manière prospective¹ la vitesse de marche, en utilisant la stratégie de maintien d'un angle de gisement constant ("constant bearing angle strategy"). Les auteurs n'ont pas noté d'effet majeur de la trajectoire (curviligne vs. rectiligne) sur la performance. Nous n'avons pas connaissance de travaux menés sur ces questions dans une tâche d'évitement de collision entre marcheurs. Ces questions sont pourtant fondamentales pour évaluer la validité de notre métrique *mpd*, vue jusqu'à présent comme une extrapolation linéaire des états courants, dans l'étude des interactions entre marcheurs.

Ainsi, nous avons considéré la situation pour laquelle un participant, sur une trajectoire rectiligne croise un marcheur virtuel se déplaçant sur une trajectoire curviligne, en comparaison avec une trajectoire rectiligne. Le choix de la réalité virtuelle s'est imposé par la nécessité d'un contrôle fin de la trajectoire du marcheur à éviter. Plus précisément, nous avons cherché à savoir si la nature de la trajectoire du marcheur virtuel (curviligne vs. rectiligne) influence la capacité du participant à estimer les conditions futures de l'interaction et donc à adapter de manière appropriée son mouvement pour éviter la collision. Nous avons pu montrer par exemple qu'en se basant sur une extrapolation linéaire des positions futures, le marcheur adapte sa trajectoire uniquement si la distance future de croisement est inférieure à 1m. Il semblerait que l'ordre de passage au croisement soit aussi établi tôt dans l'interaction et demeure inchangé. Cependant, dans le cas d'une trajectoire courbe, l'accélération normale permet de changer constamment la direction du mouvement tout en maintenant une vitesse tangentielle constante, et il n'est pas clair si cette composante est prise en compte pour estimer les conditions futures de l'interaction. La figure 2.46 présente un exemple pour illustrer ce propos dans le cas où aucune adaptation de mouvement de la part des participants et de la part de l'humain virtuel n'est réalisée. En rouge, est représenté le risque de collision effectif entre le participant

1. Le contrôle prospectif est l'utilisation continue d'informations visuelles pour la régulation d'une action continue. En revanche, le contrôle prédictif est un comportement adaptatif à partir d'une variable perceptive initiale et les mises à jour ultérieures d'un stimulus n'affectent pas la régulation de l'action (KATSUMATA et RUSSELL, 2012).

et l'humain virtuel (quelle que soit la trajectoire suivie) : ce risque est matérialisé par une *mpd* constante, *mpd* évaluée dans ce cas par une extrapolation linéaire en cas de trajectoire rectiligne ou par une extrapolation curvilinéaire en cas de trajectoire curviligne. Dans ce cadre, du début à la fin de l'interaction le participant est supposé passer second (signe négatif de *mpd*) avec une distance de 30cm de l'humain virtuel. Les courbes bleue et orange représentent quant à elles l'évolution théorique de *mpd* pour une trajectoire de l'humain virtuel curviligne de rayon respectif 5 et 10m, *mpd* étant calculée cette fois par une extrapolation linéaire des trajectoires curvilignes, pour rappel dans le cas où aucune adaptation de mouvement n'est réalisée. On se rend ainsi compte que si une telle extrapolation a lieu, alors l'estimation des conditions futures de l'interaction au moment où le participant peut voir l'humain virtuel sera erronée, tant du point de vue du risque de collision (la valeur initiale est supérieure à 1m pour la courbe bleue, ne nécessitant pas a priori d'adaptation de mouvement) que de l'ordre de passage (le participant est estimé passer premier alors qu'en réalité il doit être second). Ceci peut alors avoir des implications sur le déclenchement de la manœuvre d'évitement de collision.

Nous avons donc développé une expérience en réalité virtuelle, impliquant 22 participants (9 femmes, 13 hommes, 27.6 ± 4.1 ans). Le dispositif expérimental était le même que celui présenté dans la section 2.4.3. Les participants se trouvaient debout dans la salle immersive (cf. figure 2.47 droite) et se déplaçaient à l'aide d'un Joystick selon la fonction de transfert **A+R**. Des panneaux occultants étaient disposés de telle sorte que le participant puisse atteindre une vitesse de confort avant d'être en mesure de voir l'humain virtuel et nous permettaient de calculer l'instant *tsee* à partir duquel débutait l'interaction. Nous avons défini 7 conditions initiales d'interaction afin de générer des situations avec un fort risque de collision ($mpd(t_{see}) = 0, -0.3 \text{ et } 0.3\text{m}^2$), un risque intermédiaire ($mpd(t_{see}) = -0.6 \text{ et } 0.6\text{m}$) et un risque faible ($mpd(t_{see}) = -0.9 \text{ et } 0.9\text{m}$). Nous avons par ailleurs défini 5 conditions concernant la trajectoire de l'humain virtuel en manipulant la courbure de sa trajectoire ainsi que sa direction d'approche (cf. figure 2.47 gauche) :

- **N5** L'humain virtuel approche le participant par l'avant suivant une trajectoire curviligne de rayon 5m.

2. Le signe négatif de *mpd* signifie que le participant est sensé passer second au croisement

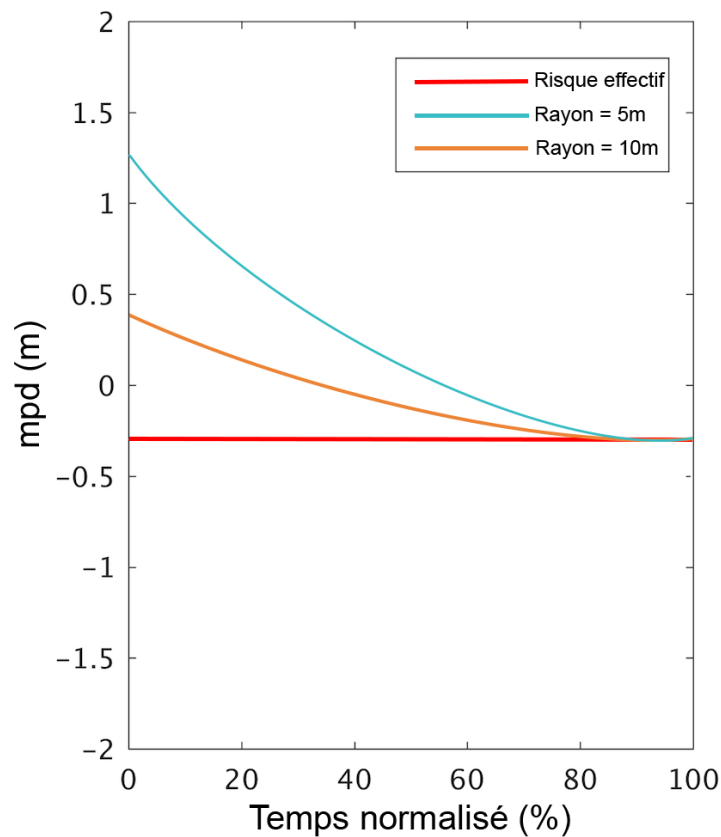


FIGURE 2.46 – Extrapolation linéaire de *mpd* lors d’une interaction avec un marcheur virtuel sur une trajectoire curvilinéaire de rayon 5m (courbe bleue) et de 10m (courbe orange). La situation correspond à celle où un participant doit passer second à une distance de 30cm du marcheur virtuel, sans adaptation de mouvement, ni du participant, ni du marcheur virtuel (courbe rouge). On remarque alors que ce type d’extrapolation linéaire sur une trajectoire curviligne entraîne des estimations erronées des conditions futures d’interaction.

- **N10** L’humain virtuel approche le participant par l’avant suivant une trajectoire curviligne de rayon 10m.
- **P5** L’humain virtuel approche le participant par l’arrière suivant une trajectoire curviligne de rayon 5m.
- **P10** L’humain virtuel approche le participant par l’arrière suivant une trajectoire curviligne de rayon 10m.
- **INF** L’humain virtuel approche le participant en suivant une trajectoire rectiligne. C’est la condition contrôle. Elle a été répétée deux fois afin d’équilibrer le plan d’expérience, en regard des trajectoire curviligne répétées selon que l’humain

virtuel approche le participant par l'avant ou par l'arrière.

Pour l'ensemble de ces trajectoires, l'humain virtuel se déplaçait à une vitesse tangentielle constante de 1.4m/s, ne réagissant pas à la présence du participant. Il provenait soit de la droite soit de la gauche du participant. Au total, chaque participant a réalisé 168 essais dans un ordre complètement randomisé ($7\text{ mpd}(tsee) \times 6\text{ trajectoires}$ (5 trajectoires différentes mais trajectoire INF répétée 2 fois) $\times 2\text{ côtés} \times 2\text{ répétitions}$).

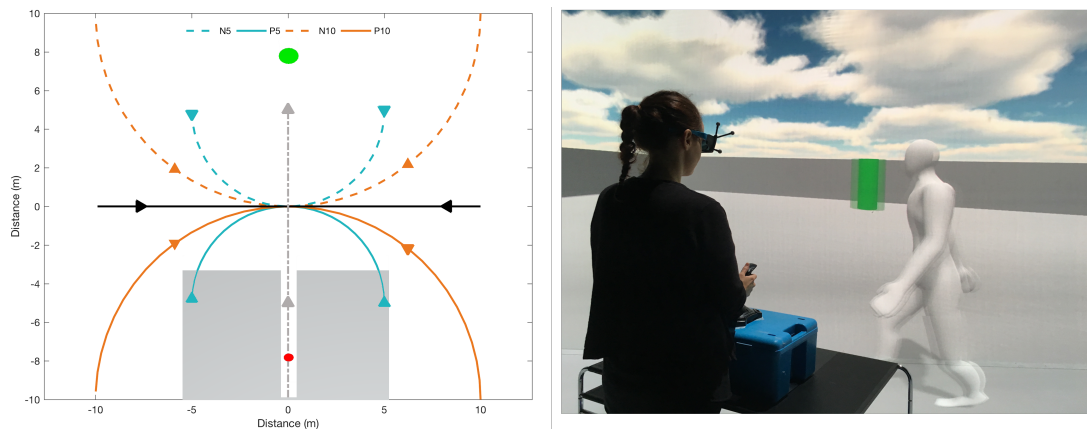


FIGURE 2.47 – Dispositif expérimental pour l'étude des interactions avec un marcheur virtuel se déplaçant sur une trajectoire curviligne. Gauche : vue schématique du dessus de l'environnement virtuel ainsi que les différents trajets suivis par l'humain virtuel. Droite : participante interagissant avec l'humain virtuel dans la salle immersive.

Nos résultats ont tout d'abord montré un effet de la trajectoire de l'humain virtuel sur la distance de croisement, qui était significativement plus petite pour la condition P5 en comparaison des autres conditions (cf. tableau 2.2). Bien que cette distance était suffisamment grande en moyenne pour préserver le marcheur d'une collision dans la plus grande majorité des cas, il est à noter que le nombre de collisions observées dans cette situation, bien que très faible, était plus élevé que la condition rectiligne. Pour l'ensemble des conditions, il n'y avait pas d'effet de la trajectoire de l'humain virtuel sur la variabilité de la distance de croisement, variabilité qui aurait pu témoigner d'une plus grande difficulté à percevoir la situation d'interaction. Ces résultats nous permettent d'avancer que les participants ont perçu les différentes trajectoires de l'humain virtuel et s'y sont adaptés de manière à éviter une collision. Néanmoins, lorsque l'humain virtuel

suit une trajectoire circulaire de rayon égal à 5m, les adaptations du mouvement du participant mènent à des distances de croisement un peu plus faibles, avec une probabilité d'entrer en collision un peu plus élevée. Si on considère à présent les inversions de l'ordre de passage prédit à t_{see} , comprises entre 3 et 18%, les résultats montrent un effet de la trajectoire de l'humain virtuel (cf. tableau 2.2). Le taux d'inversion de l'ordre de passage était inférieur dans le cas des trajectoires rectilignes avec des valeurs comparables à celles trouvées dans des conditions d'interaction similaires en réalité virtuelle (LYNCH et al., 2017), alors que la condition N5 présentait les taux d'inversion les plus élevés, avec une forte variabilité. Il semble ainsi que l'ordre de passage initial a été bien évalué pour les conditions INF, P10, N10 and P5, ce qui n'était pas le cas pour la condition N5.

TABLE 2.2 – Pourcentage de collision et d'inversion de l'ordre de passage selon la trajectoire de l'humain virtuel.

Path	Collisions			Inversions		
	Q1 (%)	médiane (%)	Q3 (%)	Q1 (%)	médiane (%)	Q3 (%)
INF	0	0	0	1.79	3.60	7.14
P10	0	0	4.56	3.57	7.14	14.29
N10	0	0	0	3.57	8.05	13.39
P5	0	3.64	7.14	3.57	8.25	10.71
N5	0	0	5.05	11.30	17.86	26.98

Intéressons nous à présent à l'évolution de la distance future de croisement lors de la phase d'interaction comprise entre t_{see} (0%) et t_{cross} (100%). Pour cela, nous avons considéré les essais ne présentant ni collision, ni inversion de l'ordre de passage. Pour ces essais, nous avons comparé pour chaque condition de $mpd(t_{see})$ l'évolution de la distance future de croisement calculée pour les trajectoires rectilignes selon une extrapolation linéaire des positions relatives futures et nommée $mpdR$, avec celle calculée pour les trajectoires curvilignes en utilisant une extrapolation curviligne de la trajectoire de l'humain virtuel, nommée $mpdC$. Nous avons également observé l'évolution de la variable $mpdL$, qui correspond à une extrapolation linéaire des positions futures sur une trajectoire curvilinéaire.

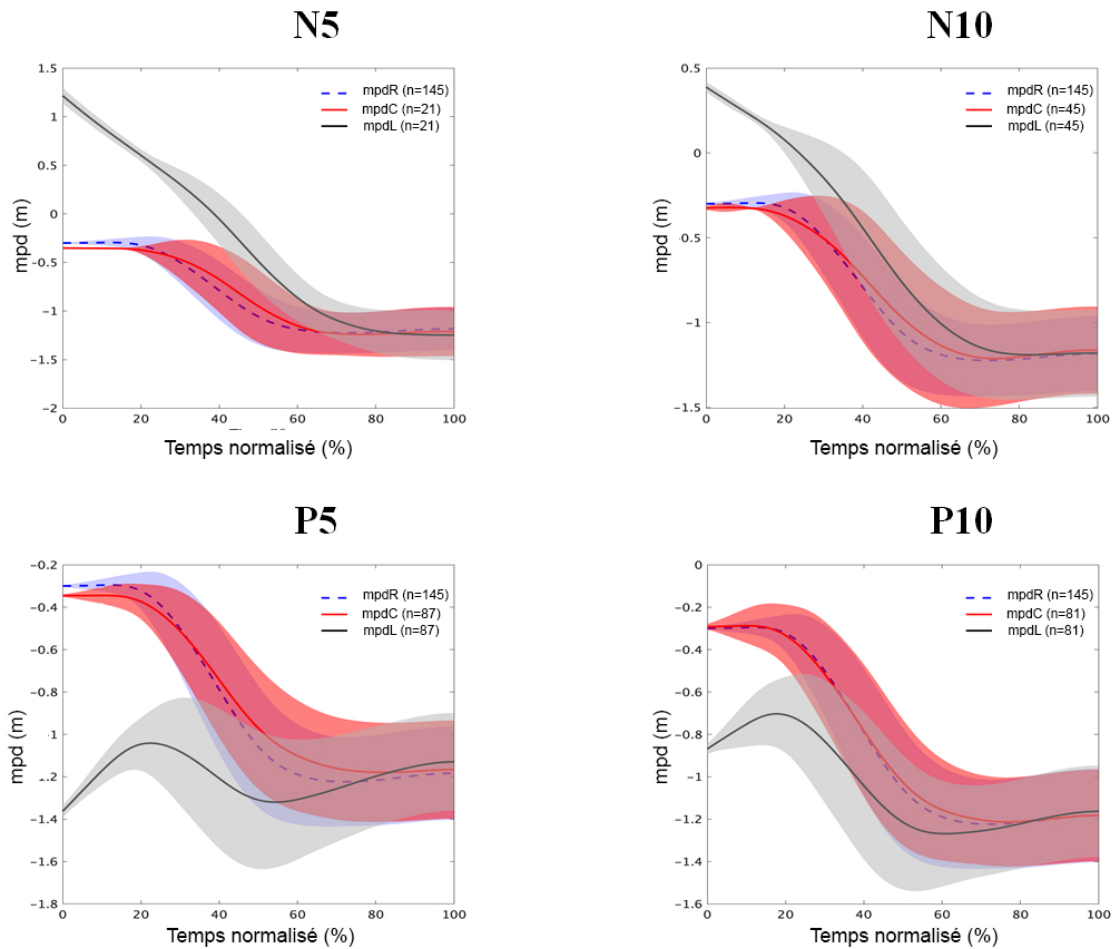


FIGURE 2.48 – Illustration de l'évolution moyenne de mpd pour des conditions initiales d'interaction où le participant est supposé passer second à 0.3m du marcheur virtuel et pour les essais n'ayant présenté ni collision ni inversion de l'ordre de passage. Sur chaque figure est représentée l'évolution de mpd calculée comme une extrapolation linéaire des positions futures pour les essais en ligne droite ($mpdR$ en pointillés bleus), comme une extrapolation linéaire sur les trajectoires curvilignes ($mpdL$, en noir) et comme une extrapolation curviligne sur les trajectoires curvilignes ($mpdR$, en rouge).

Pour l'ensemble des conditions de trajectoires et de $mpd(t_{see})$, nous avons retrouvé l'évolution temporelle en 3 phases de mpd précédemment décrite lors de l'interaction entre deux marcheurs sur des trajectoires rectilignes, en réel (OLIVIER et al., 2012, 2013) et en virtuel (LYNCH et al., 2017, 2018; OLIVIER et al., 2018). Des exemples de l'évolution moyenne de mpd pour les différentes trajectoires de l'humain virtuel dans la condition d'interaction initiale $mpd(t_{see}) = -0.3m$ sont illustrées sur la figure 2.48. Nous avons alors comparé $mpdC$ et $mpdR$ lors de la phase d'interaction au moyen des outils

"Statistical Parametric Mapping" (PENNY et al., 2011) qui permettent de comparer des séries temporelles. Aucune différence significative n'a été relevée entre *mpdC* et *mpdR*, et ce quelles que soient les conditions initiales de *mpd(tsee)* et de trajectoire de l'humain virtuel. On peut aussi relever que les courbes de *mpdL* sont très différentes de celles calculées pour *mpdC* et *mpdR* notamment au début de l'interaction, ce qui nous laisse penser que ce modèle d'extrapolation n'est pas adapté pour décrire la manière dont les marcheurs évitent une collision. Les similitudes entre l'évolution de *mpdC* et *mpdR* nous mènent à penser que la variable *mpd* est une variable pertinente pour la description et la compréhension de l'évitement de collision dans le cadre de trajectoires réalisées avec une accélération normale constante.

Comme décrit précédemment, il est possible d'identifier pour l'ensemble des conditions de trajectoires et de *mpd(tsee)* 3 phases distinctes dans l'évitement de collision décrites par l'évolution de *mpdR* et *mpdC* à savoir une phase où *mpd* est constante (observation), puis est modifiée afin d'augmenter la distance future de croisement (réaction) et enfin redevient constante (régulation) (cf. figure 2.48). Nous nous sommes alors intéressés à la durée de ces phases en temps normalisé³. En particulier, nous avons pu mettre en évidence que la phase d'observation est plus longue dans la condition P5 par rapport aux conditions INF, P10 et N10. Cette phase est également plus longue pour la condition N5 par rapport à N10. La condition N5 est également caractérisée par une phase de régulation plus tardive par rapport aux autres conditions. Ainsi, dans la condition P5 l'initiation de l'adaptation de mouvement était plus tardive, la collision était résolue plus tôt et la distance de croisement était plus petite que dans les autres conditions. A l'inverse, la période de régulation de N5 était plus tardive que pour la condition INF, bien que n'influençant pas la distance future de croisement. Il semble donc que l'interaction avec un humain virtuel marchant sur des trajectoires curvilignes, bien que préservant les caractéristiques principales de l'évitement de collision avec un marcheur se déplaçant sur une trajectoire rectiligne, ait été perturbée, notamment pour les conditions de courbure élevée (N5 et P5).

3. Notons qu'il n'y avait pas de différences significatives entre toutes les conditions de trajectoires concernant la durée de la phase d'interaction en temps non normalisé

La capacité à identifier correctement la nature des trajectoires curvilignes a déjà été démontrée lors de tâches d'interception (BASTIN, CRAIG et MONTAGNE, 2006 ; BOSCO, DELLE MONACHE et LACQUANITI, 2012) et ces capacités ont été présentées dans des paradigmes d'occultation partielle (voir BOSCO et al., 2015 pour une revue). Toutefois, à notre connaissance, nos travaux sont les premiers à avoir examiné cette question lors d'une tâche d'évitement de collision entre deux marcheurs. Qualitativement, toutes les conditions expérimentales ont reproduit des adaptations de mouvement similaires selon une phase d'observation, de réaction et de régulation. Nous avons montré que la nature des informations provenant de la trajectoire du marcheur virtuel (rectiligne vs. curviligne) pouvait néanmoins affecter l'interaction, notamment au niveau de la distance de croisement ainsi que la temporalité des phases de l'évolution de *mpd*. Il faut cependant noter que ceci n'a été observé que pour des trajectoires de plus forte courbure (5m). De même, nous pouvons faire ce constat parmi le petit nombre d'essais pour lesquels nous avons relevé une collision ou une inversion de l'ordre de passage. Une trajectoire curviligne de 10m n'a pas eu d'effets significatifs sur le nombre de collisions ou d'inversions par rapport à la condition de contrôle rectiligne. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour considérer l'influence de la présence d'une accélération lors de l'évitement de collision, que ce soit en considérant des trajectoires curvilignes à vitesse constante de rayon différent que de trajectoires rectilignes présentant des modifications de la vitesse d'avancement (uniformément accélérée, accélération non constante,...), et pour évaluer les stratégies de contrôle utilisées afin d'éviter la collision avec le marcheur dans de telles conditions.

2.5.2 Facteurs individuels

Après avoir présenté une partie de nos travaux ayant considéré l'effet des facteurs situationnels, nous allons à présent nous attacher à passer en revue nos recherches liées à l'influence des facteurs individuels sur les coordinations visuo-motrices impliquées dans l'évitement de collision entre deux marcheurs. Ces travaux ont été réalisés en collaboration étroite avec l'équipe de Michael Cinelli (Laboratoire "Lifespan Psychomotor Behaviour", Université Wilfrid Laurier, Canada) et financés par des bourses de mobilité MITACS ainsi que le programme d'équipe associée Inria BEAR (from BEhavioral Analysis to modeling and simulation of interactions between walkeRs). En particulier, nous avons porté notre attention sur deux aspects principaux. Le premier concerne le rôle de l'âge : pour cela, nous avons développé deux expérimentations impliquant d'une part des enfants âgés de 8 à 12 ans (RAPOS et al., 2019) et d'autre part des personnes d'âge supérieur à 65 ans (GRUNDBERG et al., 2019), illustrées sur la figure 2.49 b et c). Le second concerne les athlètes ayant subi une commotion cérébrale (cf. figure 2.49 d), (SNYDER et al., 2019). Avant de détailler chaque aspect dans des sous-sections spécifiques, nous allons présenter le protocole expérimental commun à ces trois études.

Nous avons ainsi répliqué la tâche de croisement à 90° entre deux marcheurs telle que décrite dans la section 2.3 et illustrée sur la figure 2.49a. Les dimensions de la zone expérimentale étaient de 9m×9m pour les études menées chez les enfants et les athlètes ayant subi une commotion cérébrale et de 12m×12m pour l'étude menée chez les personnes âgées. Pour chaque session expérimentale, des groupes de 4 ou 6 participants étaient impliqués selon leurs disponibilités communes. Chaque groupe était alors constitué pour moitié de jeunes adultes sains (C) permettant de définir des conditions contrôles et pour autre moitié de la population spécifique (PS). Au sein de chaque session, les essais étaient alors randomisés de telle sorte que chaque marcheur interagissait 20 fois avec un marcheur du même groupe et 21 fois avec un marcheur de l'autre groupe incluant ainsi les combinaisons d'interaction suivantes 1) C-C ; 2) PS-PS ; 3) C-PS ; 4) ainsi que des essais où 1 seul participant marchait, ce qui permettait de mesurer sa vitesse de confort ainsi que de créer une certaine incertitude quant au type d'interaction. Au total, les sessions de 6 personnes comprenaient 141 essais et celles de 4 personnes 91 essais.

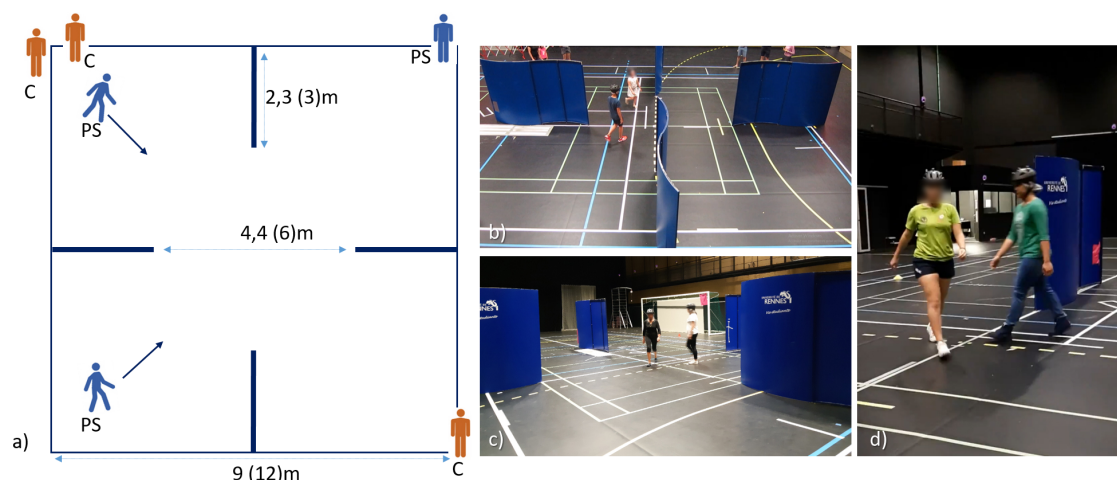


FIGURE 2.49 – Afin d’étudier l’effet des facteurs individuels sur les coordinations visuo-motrices impliquées durant l’interaction entre marcheurs, nous avons proposé un paradigme de croisement à 90° entre deux marcheurs (a). Nous avons mené 3 expérimentations afin d’évaluer l’effet de l’âge (chez les enfants (b) et les personnes âgées (c)) ainsi que les effets persistants d’une commotion cérébrale. Chaque session expérimentale impliquait 4 à 6 marcheurs, pour moitié des jeunes adultes représentant la population contrôle (C) et pour autre moitié la population spécifique (PS) d’intérêt. Les dimensions de la zone expérimentale sont indiquées sur la figure a, celles entre parenthèses correspondant à l’étude menée chez les personnes âgées.

Pour ces 3 études, les participants portaient un casque de vélo sur lequel étaient disposés des marqueurs réfléchissants dont la position au cours du temps était capturée au moyen d’un système opto-électronique disposé tout autour de la zone expérimentale. Nous nous sommes intéressés au seuil de *mpd(tsee)* déclenchant une manœuvre d’évitement de collision, au pourcentage d’inversion de l’ordre de passage, à la distance séparant les deux marcheurs au moment du croisement, à l’évolution de *mpd* durant la phase d’interaction ainsi qu’aux contributions des deux marcheurs à la résolution de la tâche d’évitement de collision. Nous avons alors évalué l’effet des marcheurs impliqués dans l’interaction sur chacune de ces variables en considérant 4 groupes : 1) C-C ; 2) PS-PS ; 3) C-PS ; 4) PS-C, la nuance entre les groupes 3 et 4 résidant dans l’ordre de passage du marcheur C et du marcheur PS, le marcheur C passant premier dans le groupe 3 et second dans le groupe 4.

Nous allons ainsi détailler dans les sous-sections suivantes les spécificités des populations considérées ainsi que les principaux résultats obtenus.

Effet de l'âge*Enfants âgés de 8 à 12 ans.*

Alors qu'il existe une littérature riche sur le thème des interactions entre marcheurs pour un ensemble d'individus jeunes et sains, aucune étude à notre connaissance n'a porté sur une population d'enfants. Pourtant, de nombreux travaux ont pu mettre en évidence des différences entre ces deux populations dans des tâches locomotrices en interaction avec leur environnement. L'expérience locomotrice semble être un facteur important qui affecte les stratégies locomotrices pour éviter un obstacle durant des trajectoires dirigées vers un but. Les chercheurs ont mis en évidence que les enfants commencent à mettre en place des patterns locomoteurs qui ressemblent à ceux des adultes lors d'une marche dans un environnement non encombré à partir de 5 ans (BERGER, ALTENMUELLER et DIETZ, 1984; SAMSON et al., 2011). Cependant l'habileté des enfants à adapter leur marche dans des environnements changeants serait immature à ce jeune âge (BERARD et VALLIS, 2006; MCFADYEN, MALOUIN et DUMAS, 2001; MICHEL et al., 2010).

Patla et al. (1996) furent parmi les premiers auteurs à s'intéresser à la question des stratégies mises en place pour éviter un obstacle durant la locomotion chez l'enfant, en comparaison avec l'adulte jeune et âgé. Dans leur protocole expérimental, les participants devaient éviter des obstacles de différentes hauteurs en passant soit au-dessus, soit en les contournant. Leurs résultats ont montré que chez les enfants âgés de 14 à 30 mois, on pouvait noter des incohérences dans le choix des stratégies d'évitement pour des obstacles de hauteurs différentes. A l'inverse, les adultes jeunes et âgés basaient le choix de la stratégie sur la hauteur des obstacles suggérant que des facteurs à la fois physiques et psychologiques jouaient un rôle important dans la sélection des stratégies locomotrices. Berard et Vallis (2006) ont quant à eux évalué l'effet du nombre d'obstacles à franchir (1 ou 2) ainsi que de la luminosité, sur la marche d'enfants âgés de 7 ans en comparaison avec de jeunes adultes (20-24 ans). Leurs résultats ont mis en évidence que les jeunes adultes présentaient des comportements similaires quelles que soient les conditions expérimentales. A l'inverse, les enfants réalisaient des adaptations plus importantes dans les conditions les plus complexes. Pour les auteurs, cette stratégie

d'adaptation plus prudente chez l'enfant démontre que le contrôle anticipateur adaptatif durant la locomotion n'est pas tout à fait développé à 7 ans et que ces enfants s'appuient fortement sur les informations visuelles pour guider leur locomotion. En accord avec ces résultats, McFadyen et al. (2001) et Michel et al. (2010) mettent en avant que les enfants jusqu'à un âge de 9 ans ne sont pas encore capables d'utiliser des ajustements locomoteurs anticipateurs lors de tâche qui impliquent de passer par-dessus un obstacle. Les résultats de l'étude de Michel et al. (2010) ont ainsi montré que des enfants âgés de 6-8 ans présentaient des performances motrices plus faibles que celles d'enfants plus âgés (9-12 ans) ou d'adultes, et que cet écart augmentait avec la difficulté de la tâche. Enfin, l'étude de Vallis et McFadyen (2005) s'est intéressée aux stratégies mises en place par des enfants âgés de 8 à 12 ans pour contourner un obstacle en comparaison avec des jeunes adultes. Dans cette étude, les auteurs soulignent que durant leur développement typique, les enfants passent d'une stratégie de contrôle tête-tronc immature "en bloc" afin de réduire le nombre de degrés de liberté à contrôler à une stratégie articulée permettant de prendre en compte les informations issues de la tête et du tronc pour interpréter de façon précise les informations visuelles et vestibulaires liées au contrôle de l'équilibre (ASSAIANTE, 1998 ; ASSAIANTE et AMBLARD, 1993). Ainsi, entre 8 et 12 ans, les mouvements locomoteurs commencent à s'organiser autour de repères fixes de l'environnement (MCFADYEN, MALOUIN et DUMAS, 2001). L'étude de Vallis et McFadyen (2005) vient conforter alors les précédents travaux sur le franchissement d'obstacles en mettant en avant différentes stratégies anticipatrices entre les enfants et les adultes pour contourner un obstacle. En particulier, il existe des différences dans les coordinations segmentaires de la tête et du tronc qui suggèrent que les enfants acquièrent les informations visuelles d'une manière différente de celle des adultes et sont plus dépendants des entrées visuelles pour guider leurs stratégies de contournement. Enfin, on peut souligner que les stratégies utilisées par des enfants pour le contournement d'un obstacle fixe sont différentes de ce que nous venons de décrire pour des adultes (VALLIS et MCFADYEN, 2005). En effet, leur vitesse de marche diminue deux pas avant le croisement de l'obstacle, tout comme la longueur du pas, un pas avant l'obstacle. La déviation médiolatérale, qui s'effectue plusieurs pas avant le croisement de l'obstacle chez l'adulte, est initiée juste avant l'obstacle chez

l'enfant. Par ailleurs, nous venons de voir que les adultes réorientent la tête et le tronc en même temps que le centre de masse alors que les enfants réorientent la tête et le tronc, toujours en même temps mais avant la déviation du centre de masse. Cette différence de stratégie anticipatrice fait dire aux auteurs que les enfants intégreraient différemment les informations visuelles et y seraient plus dépendants pour guider leur stratégie de contournement. Les auteurs évoquent alors un partitionnement du contournement de l'obstacle fixe selon deux tâches : le changement de direction initiale par un mouvement proactif de la tête et du tronc puis les ajustements de la démarche par une augmentation de la largeur du pas juste avant l'obstacle.

Intéressons-nous à présent aux études ayant analysé les stratégies locomotrices en relation avec les caractéristiques des participants et celles de l'environnement. En particulier, les études impliquant des enfants ont montré que le recours aux mesures géométriques telle que la largeur des épaules n'était pas uniforme au cours du développement et qu'il était possible que les enfants se basent fortement sur des facteurs dynamiques plutôt que géométriques. Lorsque des enfants de 4 à 6 ans doivent passer par-dessus un obstacle, il a été montré que la distance entre le pied et l'obstacle (qui est élevée par rapport à l'adulte) peut être prédite par le niveau de variabilité du mouvement (SNAPP-CHILDS et BINGHAM, 2009), menant les auteurs à conclure que les actions que produisent les enfants face à un obstacle sont en lien avec leur niveau de contrôle moteur plus que les propriétés géométriques du corps. Ce résultat peut être mis en lien avec les travaux de Schmuckler et al. (1996) qui ont montré que la hauteur de pas dépendait de l'expérience à la marche. D'autres auteurs ont également mis en évidence ce mode de contrôle dans des tâches de passage d'ouverture. Il a par exemple été montré que le seuil critique (ratio largeur ouverture / largeur épaule) en deçà duquel des enfants de 8-10 ans tournaient leurs épaules était supérieur (1,6) à celui observé chez les adultes (1,3) (WILMUT et BARNETT, 2011). En plus de ce seuil critique supérieur, les auteurs ont observé que ces enfants produisaient des rotations des épaules de plus grande amplitude dont les valeurs peuvent être prédites par les capacités d'actions de ces enfants, en particulier la variabilité des mouvements de rotation des épaules et de l'oscillation latérale du tronc. Finalement,

Hackney et Cinelli (2013) ont étudié chez des enfants âgés de 7 ans, ces tâches de passage d'ouverture mais dans un environnement ouvert, c'est-à-dire que les enfants pouvaient soit passer dans l'ouverture, soit la contourner. A l'image des adultes, les enfants dans ce type de tâche privilégient de contourner l'obstacle plutôt que de tourner leurs épaules lorsque l'ouverture est trop étroite pour passer de face. Cependant, contrairement aux adultes dans ce type de tâche dans un espace non confiné, les enfants ne choisissent pas de changer leur chemin en fonction d'une largeur particulière d'ouverture et montrent à la place de comportements non stéréotypés. Cette non reproductibilité des actions est corrélée positivement avec la variabilité des oscillations médio-latérales du corps à l'approche de l'obstacle, allant ainsi une nouvelle fois dans le sens du rôle important des facteurs dynamiques dans le contrôle du mouvement des enfants.

Ces différents éléments de la littérature nous ont permis de mettre en avant que les comportements locomoteurs étaient différents chez l'enfant par rapport à l'adulte. En particulier, les stratégies locomotrices adaptatives sont immatures avant l'âge de 9 ans et la manière dont le mouvement de ces enfants est contrôlé semble plus reposer sur des facteurs dynamiques liés à leurs possibilités de mouvements (en particulier la variabilité de leur mouvement) que sur des facteurs géométriques liés à leurs dimensions corporelles. Par ailleurs, l'ensemble des études proposées chez l'enfant marcheur (7-12 ans) en interaction avec un environnement considèrent dans leur grande majorité des franchissements ou contournements d'obstacles fixes mais pas le cas d'obstacles mobiles. Pourtant, l'interaction avec d'autres marcheurs est une tâche réalisée fréquemment dans les tâches les plus quotidiennes des enfants comme dans la cour d'école, dans la rue pour prendre le bus ou encore sur un terrain de sport... L'objectif de cette recherche était ainsi de comprendre la manière dont les enfants adaptent leur mouvement lorsqu'ils interagissent avec un autre marcheur.

18 enfants (E) ($10\text{ans} \pm 1.5$, $146.6\text{ cm} \pm 11.7$, 8 filles) et 18 jeunes adultes (J) ($34\text{ans} \pm 9.6$, $170.7\text{cm} \pm 11.1$, 11 femmes) ont ainsi participé à cette étude selon le protocole décrit en début de section. La vitesse de marche de confort des enfants

(1.53m/s $\pm$ 0.18) durant les essais de marche sans interaction avec un autre marcheur n'était pas significativement différente de celle des adultes (1.52m/s $\pm$ 0.14). Le tableau 2.3 rapporte dans un premier temps les résultats obtenus pour chaque catégorie d'interaction concernant le seuil de $mpd(t_{see})$ en deçà duquel nous avons observé une adaptation du mouvement des marcheurs afin d'augmenter la distance future de croisement, le pourcentage d'inversion de l'ordre de passage au croisement ainsi que la distance effective de croisement pour les essais dans lesquels nous avons observé une adaptation de mouvement. Les résultats révèlent ainsi que les marcheurs ont adapté leurs trajectoires pour augmenter $mpd(t)$ lorsque $mpd(t_{see})$ était inférieure à 0.9m pour les essais impliquant deux jeunes adultes (JJ), ce qui est comparable aux valeurs observées dans nos études précédentes (OLIVIER et al., 2012). En revanche, dès que les interactions concernaient un enfant, ce seuil était plus faible et égal à 0.7m pour les essais impliquant deux enfants (EE) et 0.8m pour les essais impliquant un jeune adulte et un enfant quel que soit l'ordre de passage au croisement (EJ et JE). Nous n'avons pas observé de différences notables concernant les inversions de l'ordre de passage, qui se révèlent être relativement faibles pour les différentes catégories avec des valeurs comprises entre 5 et 8.5%. Enfin, nous avons pu mettre en avant un effet du groupe sur la distance de croisement, avec des valeurs plus élevées pour la condition JJ et plus faibles pour la condition EE, les conditions EJ et JE présentant des valeurs comparables entre elles.

TABLE 2.3 – Seuil de $mpd(t_{see})$ déclenchant une adaptation de mouvement des marcheurs, pourcentage d'inversion de l'ordre de passage au croisement et distance moyenne de croisement ($\pm$ SD) pour les essais dans lesquels nous avons observé une adaptation de mouvement impliquant deux jeunes adultes (JJ), deux enfants (EE), un jeune adulte passant premier et un enfant passant second (JE) et un enfant passant premier et un jeune adulte passant second (EJ).

	JJ	EE	JE	EJ
Seuil de $mpd(t_{see})$ (m)	0.9	0.7	0.8	0.8
Inversions ordre de passage (%)	7.8	7.2	5	8.5
Distance de croisement (m)	0.77 $\pm$ 0.15	0.58 $\pm$ 0.14	0.71 $\pm$ 0.15	0.67 $\pm$ 0.15

Intéressons-nous à présent à l'évolution de mpd durant la phase d'interaction, illustrée sur la figure 2.50a. On peut remarquer tout d'abord des formes très similaires de $mpd(t)$ pour l'ensemble des groupes, avec une première phase ascendante de réaction, où la valeur

de mpd est augmentée puis une phase de régulation où mpd est maintenue constante. Afin de tenir compte des seuils de $mpd(t_{see})$ différents pour chacun des groupes, qui décalent sur l'axe vertical les courbes de $mpd(t)$, nous avons comparé l'évolution de la dérivée de $mpd(t)$ et mis en avant une influence du groupe sur cette dernière. Les résultats ont montré des différences significatives entre les valeurs de la dérivée de $mpd(t)$ au tout début (entre 0 et 10%) et à la fin de la période d'interaction (entre 80 et 100%) entre le groupe EE et les 3 autres groupes, et entre JJ et EJ. On a par ailleurs relevé une différence significative entre EJ et JE à la fin de la période d'interaction (entre 80 et 100%). Alors que l'on note une progression relativement similaire de $mpd(t)$ entre les adultes et les enfants, signifiant que la dynamique de l'évitement suit des principes communs chez ces deux populations, on pourrait attribuer les valeurs plus faibles de distance interpersonnelle, que ce soit en terme de seuil de déclenchement de l'évitement et la distance de croisement effective, aux caractéristiques anthropométriques des enfants. En comparaison avec les adultes, les enfants sont plus petits et possèdent une largeur d'épaules plus faible. La préservation d'une distance interpersonnelle, basée sur une distance de collision et une distance sociale, pourrait être ainsi similaire à celle des adultes sur une échelle relative liée à leur largeur d'épaules, mais plus petite sur une échelle absolue. La littérature a mis en avant que les enfants de cet âge n'auraient pas terminé le développement de leur voie dorsale impliquée dans le traitement de l'information visuelle, résultant par exemple en un temps plus long pour traiter l'information liée à l'estimation d'une collision future (PLUMERT, KEARNEY et CREMER, 2004, 2007). En comparaison avec de jeunes adultes, les enfants présenteraient plus de difficultés dans le couplage perception-action, résultant par exemple dans une mauvaise estimation des intervalles entre deux voitures qui permettent de traverser en sécurité (PLUMERT, KEARNEY et CREMER, 2004). Une réponse retardée pour éviter une collision pourrait partiellement expliquer pourquoi la distance de croisement est plus faible lorsqu'un enfant est impliqué s'ils ne coordonnent pas de manière efficiente leur réponse motrice en fonction des informations perçues sur les éléments de l'environnement. Néanmoins, lorsqu'on s'intéresse à la dérivée de $mpd(t)$ entre deux instants successifs, bien que plus faible dans la première partie de l'interaction, une augmentation de la distance future de croisement est bien observée.

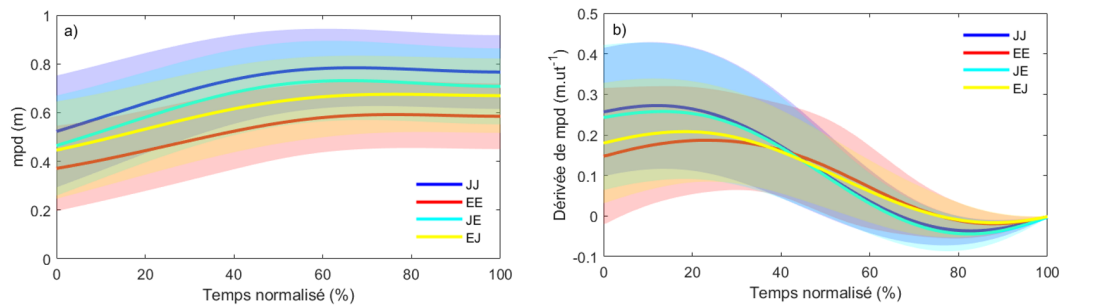


FIGURE 2.50 – Évolution de mpd (a) et de sa dérivée (b) durant la phase d'interaction lors d'un croisement impliquant des jeunes adultes et des enfants.

Pour finir, nous avons considéré les contributions de chaque marcheur dans l'évolution de mpd durant la phase d'interaction en fonction de l'ordre de passage au croisement des marcheurs, illustrées sur la figure 2.51. Quel que soit le groupe considéré, nous avons pu montrer que le marcheur passant second au croisement contribuait plus que le marcheur passant premier. L'âge du marcheur ne semblerait donc pas affecter cette attribution tacite des rôles précédemment démontrée chez de jeunes adultes (OLIVIER et al., 2013). La part importante des informations visuelles dans cette attribution semble essentielle. Lorsqu'un marcheur passe premier, il a été montré qu'il fixe le but vers lequel il se dirige plutôt que l'autre marcheur (CROFT et PANCHUK, 2017). Le marcheur qui passe second est attentif au second marcheur et lui concède le passage afin d'assurer un croisement sans collision. Il serait intéressant dans des travaux futurs de considérer l'utilisation d'un oculomètre pour approfondir cette question d'attribution des rôles.

Ainsi, ces travaux ont mis en avant que des enfants âgés de 8 à 12 ans sembleraient avoir développé des stratégies similaires à celles des adultes pour contribuer mutuellement à l'évitement d'une collision avec un autre marcheur durant la locomotion. Malgré quelques différences relevées sur le seuil de déclenchement d'une adaptation de mouvement et la distance de croisement qui pourraient mettre en avant un effet des dimensions corporelles, l'évitement de collision n'a lieu que si cela est nécessaire et très peu d'inversion de l'ordre de passage sont relevées pour l'ensemble des groupes mettant en avant dans ce cadre le rôle important des facteurs situationnels. Par ailleurs la phase de régulation présente dans l'évolution de $mpd(t)$ nous laisse penser que des stratégies

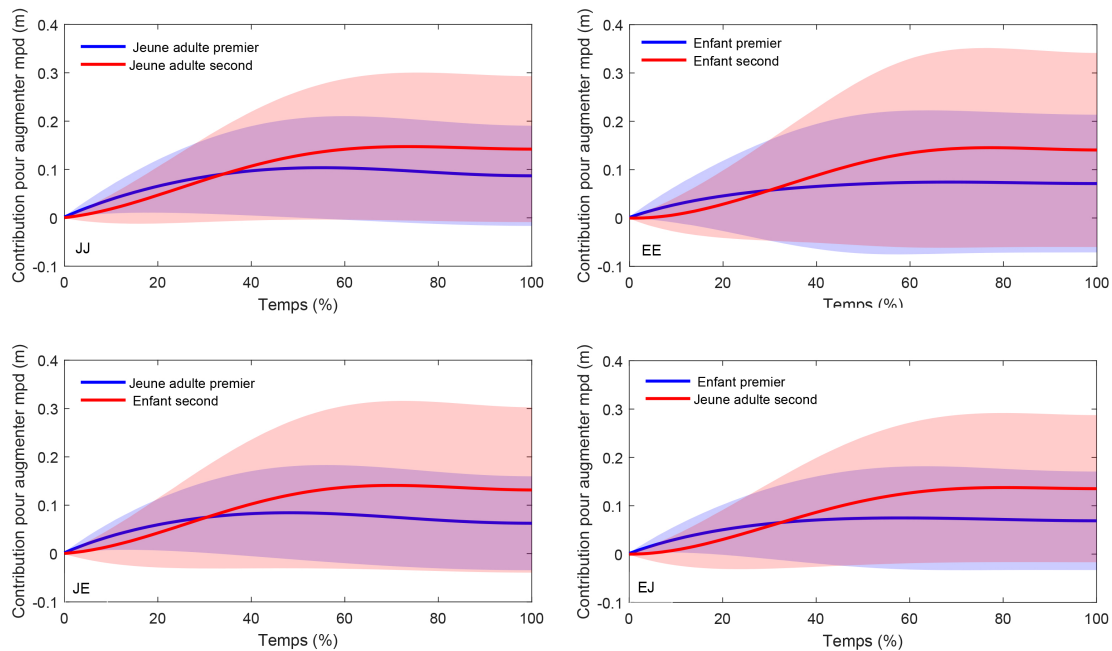


FIGURE 2.51 – Contribution cumulée de chaque marcheur dans les variations de *mpd* durant la phase d'interaction lors d'un croisement impliquant des jeunes adultes et des enfants, en fonction de l'ordre de passage au croisement.

anticipatrices sont déjà présentes dans notre population d'étude. Des expérimentations supplémentaires auprès d'une population plus jeune seraient d'intérêt majeur afin de mieux identifier à partir de quel âge les stratégies mises en place par les enfants sont comparables à celles des jeunes adultes. Des analyses supplémentaires sur le type de stratégies (en vitesse ou orientation) ainsi que les coordinations segmentaires mises en place nous permettraient également d'avoir plus d'éléments pour comprendre la manière dont la trajectoire locomotrice est contrôlée. Les données de cette étude peuvent être envisagées sous la forme d'une première base de référence afin de mieux comprendre comment la trajectoire locomotrice de l'enfant est contrôlée en comparaison avec l'adulte. En particulier, l'intérêt est de proposer de nouveaux modèles de marche chez l'enfant qui permettraient de mieux comprendre les mécanismes altérés par certaines pathologies comme les troubles de l'acquisition des coordinations, caractérisées par des variabilités importantes du mouvement de ces enfants (ROSENGREN et al., 2009).

Personnes âgées

Afin de poursuivre nos investigations sur l'effet de l'âge sur les coordinations visuo-motrices, nous nous sommes intéressés à l'effet du vieillissement en considérant une population d'adultes sains âgés de plus de 65 ans. Le vieillissement est un processus complexe, lent et progressif, impliquant divers facteurs biologiques, psychologiques et sociaux. Le vieillissement s'accompagne alors d'une diminution graduelle des processus moteurs et cognitifs avec le temps. Les mécanismes qui sous-tendent le contrôle du mouvement et de l'équilibre sont complexes car ils mettent à contribution des structures très variées du système nerveux et moteur. La perturbation des voies ou des centres impliqués dans ce contrôle à l'occasion du vieillissement physiologique et biomécanique contribue à la genèse de troubles de l'équilibre et de chutes (HORAK, 2006). Chaque année, 1 personne sur 3 âgée de 65 ans ou plus est susceptible de tomber au moins une fois (AMBROSE, PAUL et HAUSDORFF, 2013). Une grande partie de ces chutes survient durant la marche, tâche durant laquelle la personne doit adapter son mouvement à l'environnement qui l'entoure tout en contrôlant ses mouvements segmentaires et en dirigeant son attention vers le but à atteindre (BERG et al., 1997). Chez le jeune adulte, il est ainsi bien décrit que le système visuel guide la locomotion afin d'éviter une collision avec les éléments de l'environnement. Chez la personne âgée, la littérature suggère que les informations visuelles sont utilisées comme une source d'informations fiables pour le contrôle de la locomotion (LORD et WEBSTER, 1990 ; ZUKOWSKI et al., 2020). Néanmoins, les changements liés à l'âge des différents systèmes sensoriels et moteurs pourraient expliquer que les personnes âgées soient plus susceptibles de rentrer en collision avec les éléments de l'environnement ou de chuter (MIRELMAN et al., 2017 ; PATLA, PRENTICE et GOBBI, 1996). Les auteurs ont par exemple mis en avant des délais dans le traitement visuo-moteur, entraînant des délais dans la perception des caractéristiques de l'environnement et dans les adaptations mises en place en retour (MOSCHNER et BALOH, 1994). Dans la récente revue de Billino et Pilz (2019), les auteurs cherchent de démontrer l'intérêt de considérer la question de la perception du mouvement dans le développement d'un modèle du vieillissement. Dans ce cadre et en

lien avec la question de la locomotion adaptative et du contrôle postural, il a été montré que la position du centre de pression des personnes âgées était moins affectée par les informations provenant du flux optique, pouvant menacer leur stabilité durant la marche (AGATHOS et al., 2017), mais également que cette population adaptait moins bien sa vitesse et sa direction de marche en réponse aux changements des caractéristiques du flux optique (BERARD et al., 2009 ; LALONDE-PARSI et LAMONTAGNE, 2015).

Lorsque des personnes âgées se déplacent dans un environnement encombré, elles mettraient alors en place des stratégies conservatrices, en d'autres termes plus prudentes, afin de se laisser plus de temps pour évaluer la situation, augmenter les marges de sécurité et minimiser le risque de chute (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2006 ; MIRELMAN et al., 2017 ; PATLA, PRENTICE et GOBBI, 1996). Par exemple, Gérin-Lajoie et al. (2006) ont répliqué leur protocole de croisement de 2005 entre un marcheur et un mannequin fixe ou mobile (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005) en incluant une population de personnes âgées. Les personnes âgées marchaient moins vite que les plus jeunes et présentaient des longueurs de pas plus petites. La taille de leur espace personnel était également plus grande que celle des jeunes adultes. Les études s'étant intéressées aux situations de passage de portes ont montré également que les personnes âgées présentaient des seuils critiques plus élevés que les personnes jeunes (HACKNEY et CINELLI, 2011, 2013b) : cela signifie que lorsque des personnes âgées passent une ouverture, elles tournent leur épaules pour des largeurs (normalisées par la largeur d'épaules) plus élevées que les jeunes. De manière intéressante, cette différence est observée dans des tâches dynamiques mais pas statiques. Cela remet en cause l'exactitude du modèle de mise à l'échelle géométrique seule avec sans doute une prise en compte des spécificités du mouvement (e.g., plus grandes oscillations médio-latérales) dans l'interaction (WILMUT, DU et BARNETT, 2015). Nous pouvons également citer les protocoles de traversée de route dans des simulateurs piétons, où il est demandé aux participants de traverser une rue virtuelle lorsqu'ils pensent que l'intervalle entre deux véhicules est suffisant pour traverser en sécurité. Dans ce cadre, il a été montré que les personnes âgées avaient plus de difficultés à estimer le temps restant avant la collision,

les menant à prendre des mauvaises décisions quant à la traversées de route (DOMMES, CAVALLO et OXLEY, 2013). Ces décisions inadaptées, seraient dues à une incapacité à traiter les information visuo-motrices de manière rapide (DOMMES, CAVALLO et OXLEY, 2013), et ne peuvent être compensées par une marche plus rapide, rendant cette population particulièrement à risque dans les déplacements de la vie quotidienne.

Il a par ailleurs été mis en avant que la régulation de la marche nécessitait un contrôle cognitif plus grand avec l'avance en âge (AL-YAHYA et al., 2011 ; HAUSDORFF et al., 2008 ; WOOLLACOTT et SHUMWAY-COOK, 2002). Ainsi, si on demande à des marcheurs d'effectuer une double tâche lors de l'évitement de collision avec le mannequin, on observe une diminution de la vitesse de marche et une augmentation de la taille de l'espace personnel, et ce d'autant plus que les marcheurs étaient âgés (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2006). Dans une tâche d'évitement de collision avec un humain virtuel, dans laquelle le marcheur devait traiter des messages téléphoniques auditifs et textuels, les auteurs ont montré que les personnes âgées présentaient plus d'interférences cognitivo-motrices que les personnes jeunes résultant en plus d'erreurs sur la tâche liée à la compréhension du message, plus de collisions avec les humains virtuels mais sans modification de la locomotion (SILVA et al., 2019). Ceci était d'autant plus vrai que le message survenait tôt dans la phase d'interaction (SILVA et al., 2020). Les personnes âgées présenteraient alors des déficits dans la priorisation de leur sécurité durant la marche dans ces conditions de double tâche (SILVA et al., 2019).

Naviguer dans un environnement dynamique est une tâche qui nécessite des coordinations visuo-motrices efficaces et qui peut alors s'avérer plus complexe pour la personne âgée. Nous proposons ainsi dans cette étude d'analyser cette population dans le cas d'un croisement entre marcheurs. Sur la base des éléments de la littérature nous nous attendons à observer des stratégies plus conservatrices chez la personne âgée avec des seuils de *mpd(tsee)* déclenchant une adaptation du mouvement plus élevés ainsi que des distances de croisement plus importantes. 17 personnes âgées (groupe A, 68 ans $\pm$ 3, 12 femmes, 5 hommes) et 17 jeunes adultes (groupe J, 23 ans $\pm$ 2, 6 femmes, 11 hommes) ont ainsi

pris part à notre étude. Les jeunes adultes étaient plus grands (174.82 ± 8.87 cm) que les personnes âgées (164.65 ± 7.67 cm) mais leur largeur d'épaules ne présentait pas de différence significative (J : 43.26 ± 3.64 cm, A : 40.65 ± 4.06 cm). Il n'y avait pas non plus de différence concernant les scores du test GPAQ (BULL, MASLIN et ARMSTRONG, 2009) reflétant l'activité physique des participants. La vitesse de marche des personnes âgées (1.42 ± 0.18 m/s) était inférieure à celle des jeunes adultes (1.51 ± 0.18 m/s) lors des essais sans interaction avec un autre marcheur.

TABLE 2.4 – Seuil de *mpd(tsee)* déclenchant une adaptation de mouvement des marcheurs, pourcentage d'inversion de l'ordre de passage au croisement et la distance médiane de croisement pour les essais dans lesquels nous avons observé une adaptation de mouvement impliquant deux jeunes adultes (JJ), deux personnes âgées (AA), un jeune adulte passant premier et une personne âgée passant seconde (JA) et une personne âgée passant première et un jeune adulte passant second (AJ).

	JJ	AA	JA	AJ
Seuil de <i>mpd(tsee)</i> (m)	1.01	1.12	1.06	1.12
Inversions ordre de passage (%)	13.8	25	12.7	23
Distance de croisement (m)	0.93	0.79	0.89	0.93

Si on s'intéresse au seuil de *mpd(tsee)* déclenchant une manœuvre d'évitement de collision, présenté dans le tableau 2.4, on remarque des valeurs plus élevées pour le groupe AA et AJ (1.12m). On peut noter par ailleurs un nombre d'inversions de l'ordre de passage plus important dans le cas où la personne âgée passe en première (AA=25% et AJ=23%) par rapport au cas où un jeune adulte passe premier (JJ=13.8% et JA=12.7%). Enfin, la distance de croisement entre deux personnes âgées (0.79m) est significativement plus faible que pour les trois autres groupes (JJ=0.93m, AJ=0.93m, JA=0.89m). Sur la base de ces premiers résultats, on pourrait penser que, lorsqu'une personne âgée passe première lors du croisement, une stratégie plus conservatrice est mise en jeu dans la mesure où des adaptations de mouvement sont observées pour des risques plus faibles de collision. Néanmoins on observe plus d'inversions de l'ordre de passage lorsque une personne âgée passant première au croisement est impliquée dans l'interaction et la distance de croisement observée entre deux personnes âgées est plus faible, résultant en un comportement plus risqué. Cette distance de croisement plus faible ne peut être

mise en relation avec une différence de caractéristiques anthropométriques puisque les groupes de jeunes et d'âgés ont des largeurs d'épaules comparables.

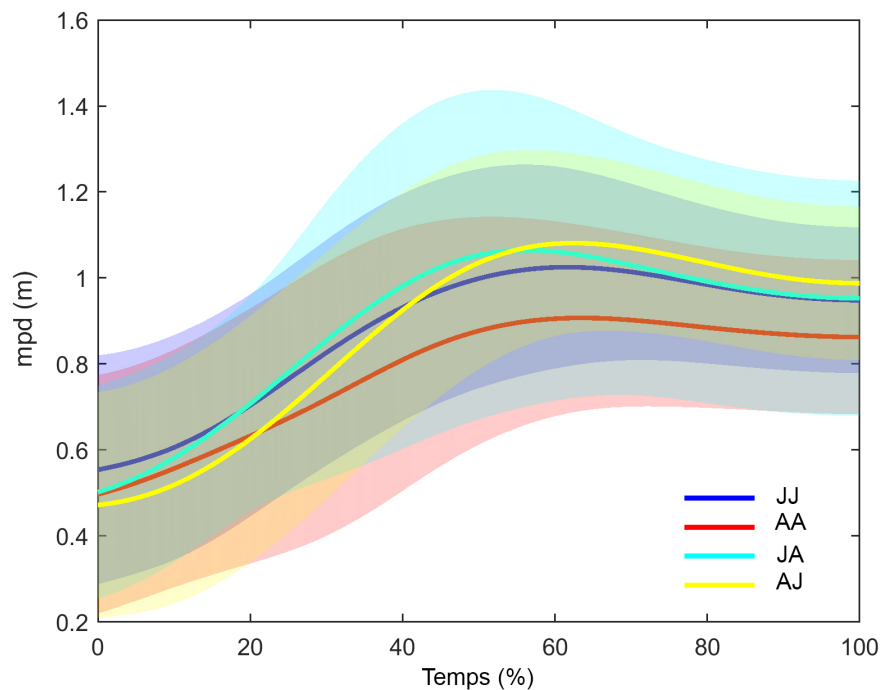


FIGURE 2.52 – Évolution de mpd durant la phase d'interaction lors d'un croisement impliquant des jeunes adultes et des personnes âgées. Les essais concernés ne présentent pas d'inversion de l'ordre de passage et correspondent à des conditions initiales pour lesquelles $mpd(t_{see})$ était inférieure à 1.01m.

Intéressons nous à présent à l'évolution de $mpd(t)$, illustrée sur la figure 2.52, pour les essais ne présentant pas d'inversion de l'ordre de passage et dont la valeur de $mpd(t_{see})$ était inférieure à 1.01m (plus petit seuil d'adaptation de mouvement observé dans le groupe JJ). On a alors pu relever une différence significative entre les groupes d'interactions, les valeurs de $mpd(t)$ du groupe AA impliquant deux personnes âgées étant toujours plus faibles que celles des autres groupes impliquant au moins un jeune adulte entre le premier tiers et la fin de l'interaction. Cette progression plus faible des valeurs de $mpd(t)$ pour le groupe AA résulte inévitablement en une distance de croisement plus faible pour ce groupe. Ceci pourrait être expliqué par le fait que les personnes âgées aient des difficultés à traiter les informations visuomotrices de manière rapide (DOMMES, CAVALLO et OXLEY, 2013), ce qui résulterait en des stratégies d'évitement de collision inadaptées.

Si on considère à présent la contribution de chaque marcheur à augmenter $mpd(t)$ durant l'interaction (cf. figure 2.53), on peut tout d'abord noter que la tâche d'évitement de collision est réalisée de manière collaborative puisque les deux marcheurs contribuent à l'évitement de collision. On observe toutefois des différences concernant les rôles dans l'interaction selon le groupe de marcheurs. Pour le groupe JJ, il n'y a pas de différence significative entre la contribution du jeune adulte passant premier et celle du jeune adulte passant second. Pour le groupe AA, la contribution du marcheur âgé passant second était plus importante que celle du marcheur âgé passant premier de 7 à 100% de la phase d'interaction. Dans le groupe JA, la contribution du jeune adulte passant premier était plus importante que celle du marcheur âgé passant second, de 20% à 100% de l'interaction. Enfin, dans le groupe AJ, la contribution du jeune adulte passant second était plus importante que celle du marcheur âgé passant premier durant la totalité de l'interaction.

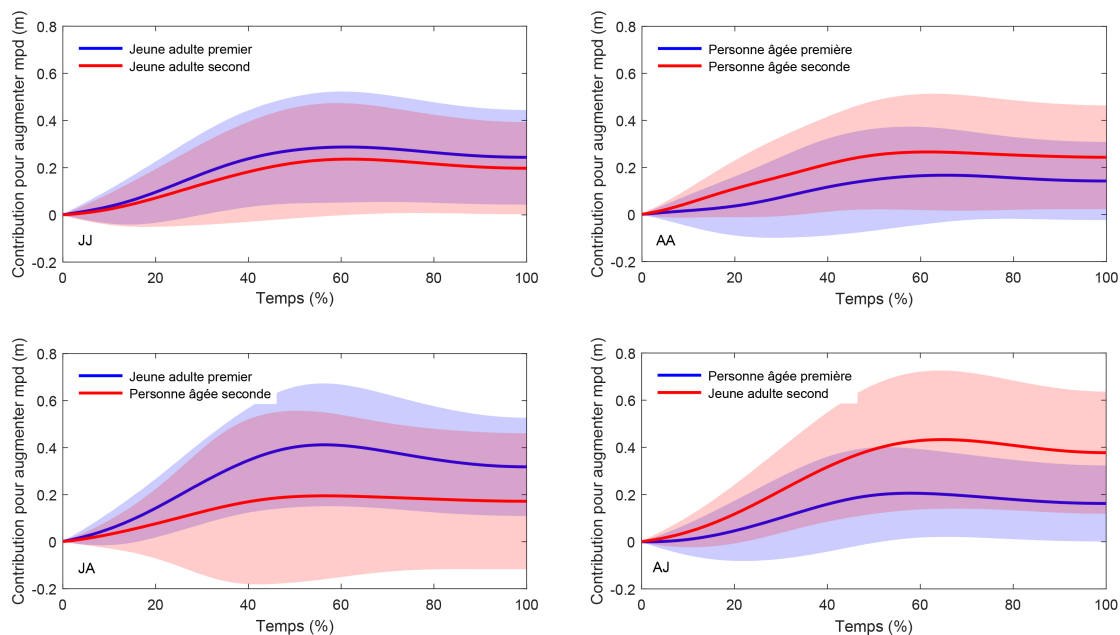


FIGURE 2.53 – Contribution cumulée de chaque marcheur dans les variations de $mpd(t)$ durant la phase d'interaction lors d'un croisement impliquant des jeunes adultes et des personnes âgées, en fonction de l'ordre de passage au croisement.

L'effet probable de l'augmentation du traitement visuomoteur ne se retrouve alors pleinement que dans la condition où deux personnes âgées interagissent. Lorsqu'un jeune adulte est présent, il compense les actions de la personne âgée, comme le révèle sa

contribution plus importante dans les groupes JA et AJ qui résulte en une distance de croisement plus élevée. On peut alors penser que le taux d'inversion de l'ordre de passage élevé dans la condition AJ reflète l'action du jeune adulte à laisser passer le marcheur âgé. Ces deux éléments pourraient être mis en lien avec la théorie des affordances dans un contexte social (FAJEN, RILEY et TURVEY, 2008) où lorsque deux individus interagissent dans le but de réaliser une action commune (ici éviter une collision), ils pourraient percevoir les possibilités d'actions de l'autre personne. Il serait intéressant de tester cette hypothèse aux aspects plus sociaux dans un paradigme de croisement en réalité virtuelle où il serait possible de manipuler l'apparence du marcheur virtuel (jeune ou âgée) et son mouvement (mouvement de marche d'une personne jeune ou âgée). Enfin, notre population d'étude était constituée de personnes âgées saines ayant une activité physique régulière. Des travaux futurs incluant des sujets âgés chuteurs serait alors pertinente, avec notamment la prise en compte de l'activité du regard, qui est affectée durant la locomotion par l'avance en âge (DOMÍNGUEZ-ZAMORA et al., 2020) et dont les liens avec les risques de chutes ont déjà pu être mis en évidence (CHAPMAN et HOLLANDS, 2006).

Effet d'une commotion cérébrale

Pour cette dernière partie concernant l'étude des facteurs individuels impliqués dans les coordinations visuo-motrices durant les interactions entre deux marcheurs, nous nous sommes intéressés aux effets persistants de la commotion cérébrale, en s'intéressant à une population de joueurs et joueuses de rugby ayant subi une commotion cérébrale dans les 6 derniers mois, mais étant déjà revenus au jeu. Dans ce cadre, une collaboration étroite s'est opérée avec Pierrick Guillemot et Patrice NGassa, les médecins des équipes de rugby rennaises masculines et féminines pour le recrutement des participant(e)s.

La commotion cérébrale peut être définie comme un traumatisme crânien et cérébral causé par des forces biomécaniques (MCCRORY et al., 2017), généralement en lien avec un coup porté à la tête ou au visage ou indirectement à une autre partie du corps. Ce type de traumatisme est rencontré dans les disciplines sportives de contact comme le rugby, la boxe, le football américain ou encore le hockey. A titre d'exemple, l'étude de Harmon et al. en 2013 estimait à 3,8 millions le nombre de commotions cérébrales survenant aux Etats-Unis chaque année durant les sports de loisir et de compétition (HARMON et al., 2013). En France, d'après l'enquête de l'observatoire médical de la fédération française de rugby, lors de la saison du Top 14 2014/2015, sur 187 matchs joués, 66 commotions cérébrales ont été observées, dont 38 ont impliqué une sortie définitive sur blessure. Ce traumatisme est pris très au sérieux par les autorités sportives françaises. A ce titre, depuis 2012, les autorités du rugby français ont mis en place un « protocole commotion » qui exige un examen des sportifs par un médecin après un choc violent sur le terrain, et un rapport par l'arbitre des suspicions de commotions cérébrales au cours des matchs. En ce qui concerne les amateurs, qui sont beaucoup plus nombreux et non assistés par un médecin, la fédération a mis en place depuis 2017 une procédure « carton bleu » qui consiste en une suspension de licence pour un week-end et un arrêt temporaire de 10 jours obligeant le sportif à consulter son médecin traitant pour un retour au jeu. Cette procédure est importante car le médecin en chef de la fédération française de rugby estime à 1800 le nombre de commotions cérébrales suspectées pour la saison 2016/2017.

La récente déclaration de consensus sur la commotion cérébrale dans le sport de 2017 suggère qu'il est possible de décrire 4 caractéristiques principales pour les commotions cérébrales chez le sportif (MCCRORY et al., 2017). Tout d'abord, une commotion cérébrale peut être causée par un choc direct sur le corps ayant pour conséquence la génération de forces impulsives transmises à la tête. Ces forces peuvent s'exprimer en translation et en rotation (HARMON et al., 2013). Suite à la commotion cérébrale, des troubles neurologiques temporaires surviennent rapidement. Ces troubles fonctionnels se résorbent en général au bout de 7 à 10 jours (MCCREA et al., 2013). Le diagnostic d'une commotion cérébrale sévère implique la présence de symptômes multiples incluant des signes physiques, des troubles de l'équilibre, des troubles cognitifs, des changements de comportement, des troubles du sommeil et d'autres symptômes comme des maux de tête, des sensibilités à la lumière, ou encore des vertiges et nausées. L'ensemble de ces symptômes est spécifique à chaque individu et à chaque commotion, tout comme leur rétablissement. Le rétablissement d'un athlète et son retour au sport suit une procédure de récupération progressive comme illustrée par le tableau 2.5 (MCCRORY et al., 2017). Cette procédure inclut six phases représentant des exigences graduelles sur l'athlète. L'athlète pourra faire son retour au sport une fois entré dans la phase asymptotique. Chaque phase dure environ 24h ce qui implique que les joueurs doivent attendre au moins une semaine avant le retour sur le terrain.

A ce stade, la récupération d'un point de vue clinique est définie par la disparition des symptômes post commotion cérébrale et un retour à des fonctions cognitives et d'équilibre normales (MCCRORY et al., 2017). Cependant, des travaux ont montré des déficits persistants après la disparition des symptômes précédemment décrits, suggérant une différence entre la récupération clinique et physiologique (BAKER et CINELLI, 2014; FAIT et al., 2013; LOCKLIN et al., 2010; POWERS, KALMAR et CINELLI, 2014a,b). C'est dans ce cadre que nos travaux se sont inscrits, en considérant les symptômes de la commotion cérébrale persistants après la récupération clinique et en particulier les aspects liés aux capacités visuomotrices.

TABLE 2.5 – Procédure de retour au sport après une commotion cérébrale d'après McCrory et al. (2017).

Phase	But	Activités
1	Activités limitées par les symptômes	Activités de la vie quotidienne (réintroduction des activités salariées ou scolaires)
2	Exercices aérobie de faible intensité	Augmentation du rythme cardiaque par une activité de marche ou de pédalage sur bicyclette ergométrique
3	Exercices spécifiques à la discipline sportive	Exercices de course, de patinage
4	Entraînement sans contact	Augmentation de la difficulté des exercices spécifiques à la discipline sportive
5	Entraînement avec contact	Evaluation des capacités fonctionnelles par la participation à des activités d'entraînement normales. Nécessite une autorisation médicale
6	Retour au jeu	Jeu typique

L'intégration de la perception et de l'action dans le cadre de l'interaction entre un individu et son environnement repose sur une relation étroite entre les systèmes de perception, les systèmes de traitement de l'information perçue et le système moteur. Tout déficit des facultés de perception ou du traitement de l'information va affecter les capacités visuo-motrices de l'individu. Dans le cadre de la commotion cérébrale, plusieurs travaux ont mis en avant des déficits visuels chez des individus ayant subi une commotion cérébrale récente (BROSSEAU-LACHAINE et al., 2008 ; HEITGER et al., 2004, 2006), en identifiant en particulier des anormalités au niveau des saccades, de la convergence et de l'accommodation. Ces déficits visuels peuvent perdurer durant les 12 premiers mois suivant la commotion cérébrale (HEITGER et al., 2006) : par exemple, la vitesse pic des mouvements des yeux dans une tâche de poursuite oculaire est significativement plus faible à celle de sujet contrôle pour des individus après commotion cérébrale et ce jusqu'à plus de 6 mois après ce traumatisme. En plus de ces déficits oculomoteurs, les études ont

mis en avant des déficits dans le traitement visuel. Par exemple, chez des enfants ayant subi une commotion cérébrale, Brosseau-Lachaine et al. (2008) ont étudié la sensibilité à des stimuli statiques et dynamiques jusqu'à 12 semaines après le traumatisme, en utilisant un paradigme d'identification, d'orientation et de direction. Les résultats ont montré une diminution de la sensibilité de ces enfants à des stimuli visuels complexes, en comparaison avec des enfants non blessés, notamment lors de tâches nécessitant l'analyse des informations du flux optique. Notons dans ce cadre que le flux optique est un paramètre crucial pour la perception de l'environnement d'un observateur en mouvement permettant notamment d'éviter toute collision avec les éléments de cet environnement. Ces recherches suggèrent ainsi que des déficits à la fois oculomoteurs et concernant le traitement des informations visuelles persistaient après une commotion cérébrale. Ces déficits peuvent alors entraîner une récupération physiologique prolongée qui peut alors augmenter le risque de blessure potentielle lors de la reprise de l'activité sportive.

Plus récemment, des travaux ont été menés sur les déficits persistant en lien avec les mécanismes d'intégration de la perception et de l'action suite à une commotion cérébrale. Ces résultats suggèrent que des tâches visuomotrices pourraient permettre d'identifier ces déficits persistant au-delà de la date de récupération clinique. Les auteurs ont par exemple utilisé le test PACT (Perception-action coupling task, SMITH et PEPPING, 2010), réalisé sur une tablette, qui consiste à déterminer si une balle peut entrer dans des trous de taille variable. Eagles et al. (2019) ont alors montré des performances plus faibles chez de jeunes athlètes ayant subi une commotion cérébrale dans les deux dernières années par rapport à des jeunes athlètes n'ayant jamais eu de commotion pour des diamètres de trou approchant la taille de la balle. Ces auteurs évoquent alors des capacités réduites de ces athlètes dans la perception des limites de l'action ("action boundary") et mettent en avant l'intérêt de ce type de test en complément du diagnostic clinique des commotions cérébrales (EAGLE et al., 2020). Catena et al. (2009) ont développé quant à eux un paradigme d'évitement de collision impliquant une double tâche. Les auteurs ont étudié la relation entre l'évitement d'un obstacle durant la marche et une tâche d'orientation spatiale de l'attention chez des individus 2, 6, 14, et 28 jours après une commotion cérébrale. Les auteurs ont trouvé que

les participants avec une habileté réduite à orienter leur attention dans l'espace étaient ceux qui présentaient une distance plus faible entre le pied et l'obstacle à franchir. Par ailleurs, les individus ayant subi une commotion récente (28 jours) présentent plus de variabilité dans cette distance de passage du pied au-dessus de l'obstacle par rapport à un groupe contrôle sans antécédents de commotion (CATENA et al., 2009).

Des stratégies plus conservatrices ont également été mises en évidence chez des individus après commotion cérébrale (WOOD et al., 2019). Durant un évitement d'obstacle en double tâche, il a été montré par exemple que ces individus marchaient plus doucement et passaient plus de temps en phase de double support en comparaison avec des individus sans historique de commotion cérébrale (MARTINI et al., 2011). Fait et al. (2013) se sont penchés quant à eux sur les comportements de navigation d'athlètes en phase post commotion dans un environnement encombré (contourner des obstacles fixes), ne présentant plus de symptômes cliniques. Les athlètes qui ont subi une commotion plus de 30 jours avant l'expérimentation maintenaient des distances à l'obstacle plus grandes que celles maintenues par un groupe contrôle sans antécédents de commotion. À l'inverse, Baker et Cinelli (2014) ont montré que des athlètes ayant subi une commotion cérébrale et ayant repris leur activité sportive utilisaient des stratégies moins prudentes durant une tâche de passage d'ouverture. En effet, il a été montré que ces athlètes franchissaient en marchant des ouvertures d'une largeur égale à 1 fois la largeur de leurs épaules, alors que de jeunes adultes franchissent des ouvertures d'une largeur de 1.3 fois la largeur de leurs épaules. Par ailleurs, ces athlètes présentaient plus de variabilité dans leurs prises de décision. Cette variabilité était d'autant plus grande que la largeur de l'ouverture correspondait à celle de leurs épaules. Ces résultats suggèrent que ces athlètes présentaient des difficultés à identifier les affordances de l'environnement en lien avec leurs dimensions corporelles. De plus, il a été mis en avant une corrélation entre la variabilité des déplacements médio-latéraux du centre de masse durant la phase d'approche et celle de ces mêmes déplacements lors du franchissement de l'ouverture. Il semblerait ainsi que l'instabilité dynamique durant la phase d'approche soit liée aux stratégies de prise de décision au moment du franchissement.

Ainsi, bien que ne présentant plus de symptômes cliniques, des individus ayant subi une commotion cérébrale présentent des déficits tant au niveau visuomoteur qu'au niveau de la stabilité dynamique qui persistent durant la phase de reprise des activités sportives compétitives. Ces déficits au niveau perceptif et moteur vont ainsi avoir des répercussions majeures sur l'interaction entre l'athlète et son environnement puisque les deux composants de la boucle perception action sont affectés. Jusqu'à ce jour, les études de la littérature se sont attachées à analyser les troubles visuomoteurs suite à une commotion cérébrale persistants après la récupération clinique en environnement statique. Pourtant, l'environnement avec lequel interagit l'athlète est caractérisé par le dynamisme des situations au sein desquelles les joueurs sont en mouvement. Dans ce cadre, l'évaluation des habiletés d'intégration de la perception et de l'action chez des athlètes après commotion cérébrale dans des situations dynamiques offre une opportunité jusqu'à ce jour inexploitée pour identifier et comprendre les déficits visuomoteurs persistants après la récupération clinique. C'est ainsi que nous avons proposé d'utiliser notre paradigme de croisement à 90° pour évaluer les coordinations visuomotrices de cette population.

13 athlètes ayant subi une commotion cérébrale (groupe C, 9 femmes, 4 hommes, 21.5 ans $\pm$ 2.8) et 13 athlètes n'ayant jamais subi de commotion cérébrale (groupe H, 9 femmes, 4 hommes, 23.3 ans $\pm$ 3.7) ont ainsi participé à notre étude. Les athlètes ayant subi une commotion cérébrale dans les 6 derniers mois, pratiquaient tous le rugby et avaient été déclarés prêts pour le retour au jeu par un médecin avant d'être inclus dans cette étude. Les athlètes "sains" pratiquaient tous un sport collectif⁴. Toutes les interactions étaient appariées sur le sexe, avec des groupes constitués soit uniquement de femmes, soit uniquement d'hommes.

La tâche de croisement a été réalisée correctement par l'ensemble des participants puisque nous n'avons pas observé de collisions. La vitesse moyenne de marche des athlètes commotionnés (1.46 ± 0.08 m/s) était légèrement supérieure à celle des athlètes

4. Le sport pratiqué n'était pas forcément le rugby mais aussi le football ou le handball étant donnée la difficulté de recruter des joueurs et joueuses de rugby non commotionnés...

sains (1.41 ± 0.13 m/s) dans les essais de marche sans interaction. Le seuil déclenchant une adaptation de mouvement était inférieur lorsque 2 athlètes commotionnés (CC) se croisaient, signifiant qu'au-delà d'une valeur de $mpd(tsee)$ de 84cm, ces derniers n'adaptaient pas leur mouvement (cf tableau 2.6). Par ailleurs, nous avons observé un pourcentage plus élevé d'inversion de l'ordre de passage dans la condition CH : dans 22.9% des essais, l'athlète commotionné était supposé passer second au croisement mais est finalement passé premier. La distance de croisement n'était en revanche pas affectée par le groupe de participants en interaction.

TABLE 2.6 – Seuil de $mpd(tsee)$ déclenchant une adaptation de mouvement des marcheurs, pourcentage d'inversion de l'ordre de passage au croisement et distance moyenne de croisement ($\pm$ SD) pour les essais dans lesquels nous avons observé une adaptation de mouvement impliquant deux athlètes sains (HH), deux athlètes commotionnés (CC), un athlète sain passant premier et un athlète commotionné passant second (HC) et un athlète commotionné passant premier et un athlète sain passant second (CH).

	HH	CC	HC	CH
Seuil de $mpd(tsee)$ (m)	1.07	0.84	0.97	0.93
Inversions ordre de passage (%)	14.7	14.8	10.4	22.9
Distance de croisement (m)	0.74 ± 0.15	0.71 ± 0.14	0.71 ± 0.14	0.72 ± 0.14

Intéressons nous à présent aux résultats concernant l'évolution de mpd durant la période d'interaction (cf figure 2.54). Afin de ne pas introduire de biais en raison du seuil différent qui déclenche une adaptation de mouvement, nous avons considéré seulement les essais sans inversion de l'ordre de passage pour lesquels $mpd(tsee)$ étaient inférieure à 0.84m, correspondant à la valeur la plus faible observée en deçà de laquelle une manœuvre d'évitement de collision était déclenchée pour l'ensemble des groupes (incluant alors 104, 83, 101 et 78 essais respectivement pour les groupes HH, CC, HC et CH). Pour ces essais particuliers, nous pouvons tout d'abord noter la grande similarité entre les valeurs de $mpd(t)$ durant l'interaction pour tous les groupes, l'analyse statistique ne mettant pas en avant d'effet significatif du groupe sur ces valeurs. En particulier, pour l'ensemble des groupes, on peut noter la présence de ce plateau caractéristique de l'évolution de mpd que nous associons à une phase de régulation (OLIVIER et al., 2012), mettant en avant la présence d'ajustements locomoteurs anticipateurs.

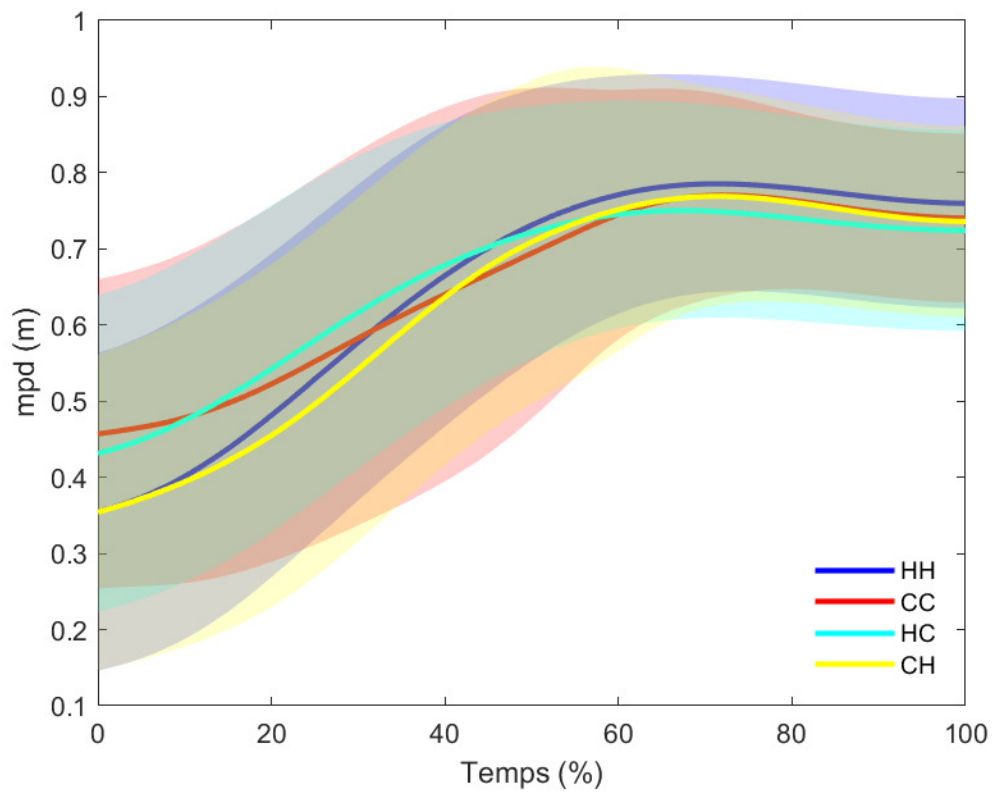


FIGURE 2.54 – Évolution de mpd durant la phase d'interaction lors d'un croisement impliquant des athlètes sains et des athlètes commotionnés. Les essais concernés ne présentent pas d'inversion de l'ordre de passage et correspondent à des conditions initiales pour lesquelles $mpd(t_{see})$ était inférieure à 0.84m.

De manière intéressante, nous observons des effets du groupe sur les contributions cumulées des deux marcheurs pour augmenter la distance future de croisement comme illustré sur la figure 2.55. Une analyse SPM basée sur des tests de Student appariés nous montre tout d'abord que lorsque deux athlètes sains se croisent (HH), le second marcheur contribue plus que le premier à augmenter $mpd(t)$ tout au long de la phase d'interaction (de 5 à 100% du temps d'interaction), ce qui correspond à ce que nous avons pu décrire dans le cas de l'interaction entre deux jeunes adultes (OLIVIER et al., 2013). Dans le cas de l'interaction entre deux athlètes commotionnés (CC), on observe également une contribution supérieure de l'athlète passant second dans la deuxième partie de l'interaction (entre 57 et 100% du temps d'interaction). Il faut toutefois être prudent dans l'interprétation de ces résultats car il est à noter la plus grande variabilité autour

des courbes moyennes d'évolution de mpd ainsi que l'existence d'essais présentant des valeurs négatives de contribution, signifiant que la stratégie d'adaptation de mouvement n'est pas appropriée car elle diminue $mpd(t)$. Dans la condition HC, il n'y a pas de différence significative entre les contributions de l'athlète sain passant premier, et celle de l'athlète commotionné passant second. Enfin, dans la condition CH, la contribution de l'athlète sain passant second est supérieure à celle de l'athlète commotionné passant premier entre 40 et 100% du temps d'interaction, avec encore une fois une variabilité un peu plus élevée dans leur contribution pour augmenter $mpd(t)$.

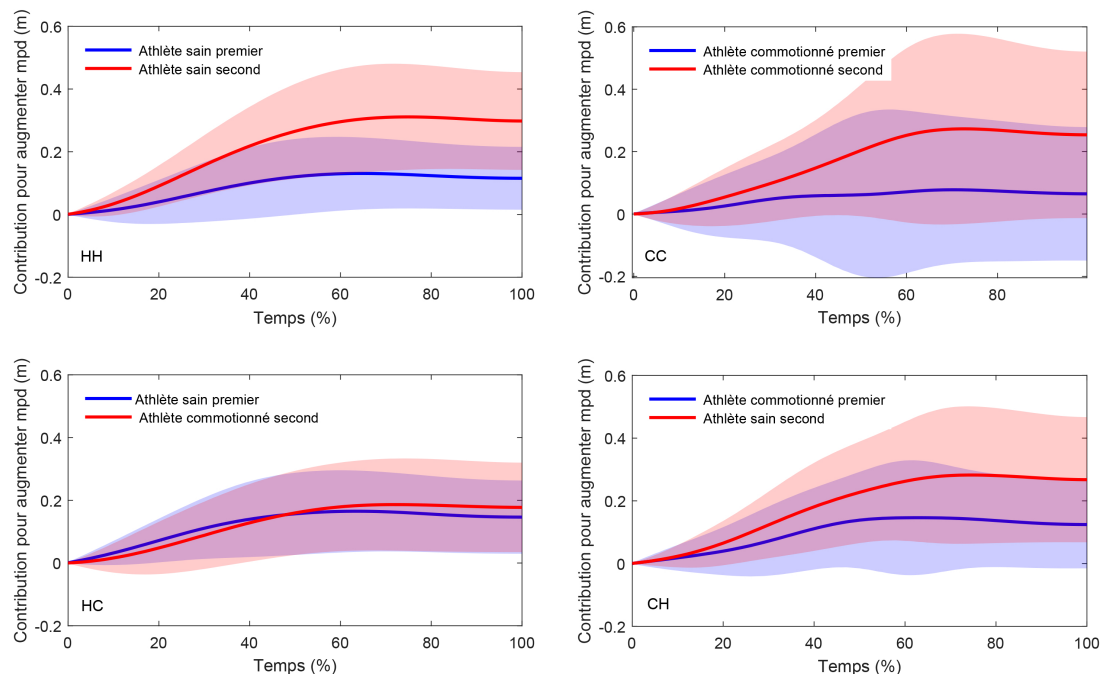


FIGURE 2.55 – Contribution cumulée de chaque marcheur dans les variations de mpd durant la phase d'interaction lors d'un croisement impliquant des athlètes sains et des athlètes commotionnés, en fonction de l'ordre de passage au croisement.

Les athlètes ayant subi une commotion cérébrale, malgré leur retour au jeu validé suite à l'absence de symptômes cliniques, semblent alors présenter des stratégies d'adaptation du mouvement pour éviter la collision différentes de celles mises en place par des athlètes sains. En dépit d'une évolution de la distance future de croisement similaire dans la majorité des essais pour lesquels aucune inversion de l'ordre de passage n'a été observée, les athlètes commotionnés présentent des contributions pour résoudre l'évitement de

collision plus faibles lorsqu'ils passent second au croisement, ainsi que des contributions parfois inadaptées et caractérisées par une plus grande variabilité. Le seuil en deçà duquel une adaptation de mouvement est initiée est par ailleurs plus faible. On peut ici faire le lien avec l'étude de Baker et al. (2014) qui avait mis en avant dans une tâche de passage d'ouverture une plus grande variabilité dans les déplacements médio-latéraux du centre de masse ou encore l'étude de Hackney et al. (2013) mettant en avant des comportements moins prudents chez les athlètes commotionnés. Cette première analyse nous révèle ainsi la présence de désordres fonctionnels persistants (et non structurels) de la commotion cérébrale et peuvent être mis en perspective avec les probabilités supérieures d'un athlète ayant précédemment subi une commotion cérébrale de se blesser de nouveau sur le terrain et avec de possibles recommandations concernant le retour au jeu. Il en va de soi que des analyses supplémentaires sont nécessaires pour augmenter la compréhension de ces désordres, en particulier en identifiant les conditions d'interactions pour lesquelles ces athlètes ont présenté des stratégies inadaptées. Il se pourrait, comme mis en avant par l'étude de Eagle et al. (2020) concernant les difficultés de ces athlètes à évaluer les limites de l'action, que les difficultés résident dans les conditions où $mpd(tsee)$ se situe autour de 0m, provoquant une incertitude sur l'ordre de passage, ou encore autour de 0.8m, provoquant une incertitude sur le besoin d'adapter ou non son mouvement. De par la grande variabilité observée dans nos données, des analyses individuelles semblent par ailleurs pertinentes, notamment dans le cadre d'application de suivi d'athlète et d'aide au diagnostic médical. Dans ce cadre, le développement de protocoles en réalité virtuelle apparaît comme une solution appropriée à la fois afin de manipuler de manière précise les conditions initiales d'interaction mais également pour proposer une solution de test compatible avec les réalités du suivi des athlètes en structure sportive. Nous détaillerons les perspectives de cette recherche dans la section 3.4.2.

2.5.3 Conclusion

Cette dernière partie de mon bilan recherche visait à présenter une sélection des études que nous avons menées afin de comprendre l'influence des facteurs situationnels et individuels sur les coordinations visuomotrices mises en jeu durant l'interaction entre deux marcheurs. Les paradigmes expérimentaux ainsi que les métriques d'analyse que nous avons développés, aussi bien en conditions réelles que virtuelles, ont montré tout leur intérêt pour étudier la question du voisinage d'interaction, de l'effet de la trajectoire de l'interacteur ou encore des spécificités de certaines populations, à l'image des enfants, des personnes âgées ou encore d'athlètes ayant subi une commotion cérébrale. Les interactions entre marcheurs, qui par définition impliquent des facteurs humains et sociaux, sont de nature complexe et sensible aux évolutions sociétales. Leur étude est donc un champ de recherche en perpétuel mouvement. A titre d'exemple, la crise de la COVID-19 possède un impact fort sur les normes de distanciations sociales comme illustré sur la figure 2.56. Il apparaît alors fondamental d'en évaluer les conséquences, afin d'avoir un avis critique sur la validité des résultats que nous avons pu mettre en avant dans le contexte actuel. Ces questions sont actuellement étudiées par les équipes de Québec et Montréal sous la direction respective de Bradford McFadyen et d'Anouk Lamontagne.

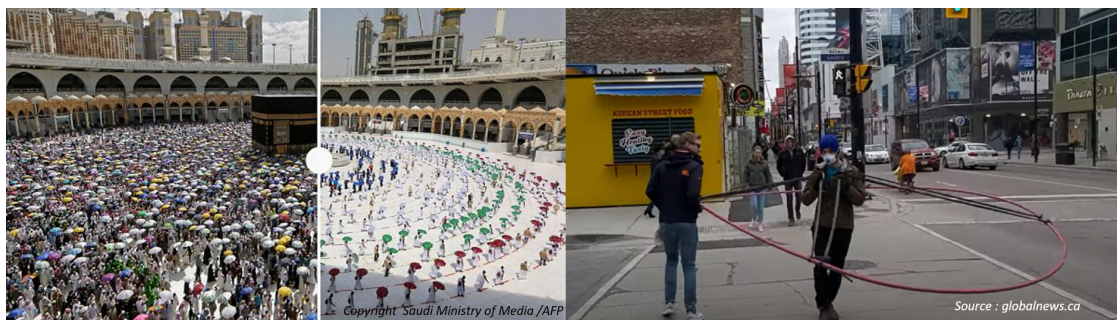


FIGURE 2.56 – Distanciations sociales et interactions entre marcheurs depuis la crise de la COVID-19. Gauche : Évolution des flux de piétons lors du pèlerinage de la Mecque entre 2019 et 2020. Droite : Illustration non sans une touche d'humour de l'espace personnel à maintenir pour respecter les recommandations de distanciation sociale dans les rues de Toronto.

De manière plus générale, le bilan de mes activités depuis ma thèse a permis de mettre en avant la progression de ma recherche, débutant par la mise en place d'un cadre expérimental et de métriques pour l'analyse des coordinations visuomotrices lors

des interactions entre deux marcheurs puis par le développement et l'évaluation de plateformes de réalité virtuelle afin de proposer un nouveau cadre d'analyse de ces coordinations et enfin par l'utilisation de ce cadre d'analyse pour investiguer différents facteurs d'influence. Cette progression a été modelée par une mobilité thématique et des collaborations fortes. Cette Habilitation à Diriger des Recherches s'inscrit dans le domaine des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives et, tout comme ce domaine, se revendique bénéficier d'une approche multidisciplinaire pour aborder les questions de recherche autour des interactions non verbales entre marcheurs. Mes travaux, dont l'approche est située au croisement des Sciences du Mouvement et des Sciences du Numérique, ont une portée multiple, qu'elle soit des plus fondamentales pour la compréhension du contrôle du mouvement qu'applicative allant des aspects cliniques, à l'amélioration du réalisme des humains virtuels au profit d'une meilleure expérience immersive, en passant par le développement de dispositifs robotiques s'inspirant des comportements d'interactions entre humains. Ces applications multiples et le besoin d'une approche multidisciplinaire pour tenter de capter la complexité de ces interactions appellent la mise en place de nouveaux projets collaboratifs. Je vais ainsi présenter dans le chapitre suivant mon projet de recherche.

Je bouge donc je suis.

— Haruki Murakami, "1Q84"

3

Projets de recherche

Table des Matières

3.1	Présentation générale	151
3.2	Axe 1 : Des variables observationnelles aux variables de contrôle.	155
3.2.1	Risque de collision : distance vs. temps	155
3.2.2	Risque de collision et risque physique : interaction entre un marcheur et un véhicule	158
3.2.3	Approche multimodale des contacts physiques	166
3.3	Axe 2 : Réalité virtuelle et interactions entre marcheurs.	169
3.3.1	Évaluation des dispositifs immersifs	169
3.3.2	Vers des humains virtuels réactifs et expressifs	173
3.4	Axe 3 : Approche individuelle des coordinations visuo-motrices	178
3.4.1	Patients douloureux chroniques et prise en charge ostéopathique	179
3.4.2	Symptômes persistants de la commotion cérébrale	182
3.5	Conclusion	185

3.1 Présentation générale

Mon projet de recherche s'inscrit en cohérence avec mes recherches passées sur l'analyse des interactions non verbales entre marcheurs. Il s'articule selon trois grands axes, présentés sur la figure 3.1 et que nous détaillerons dans les sections suivantes.

L'axe 1 est intitulé "*Des variables observationnelles aux variables de contrôle*". Jusqu'à présent, nos analyses basées sur $mpd(t)$ reposaient sur des variables qui décrivent

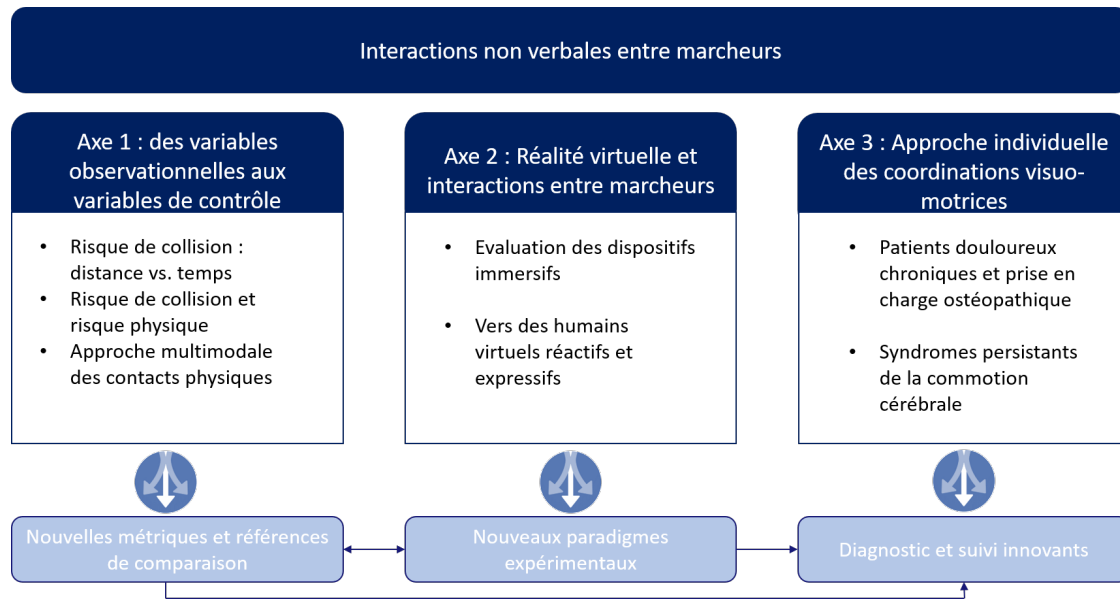


FIGURE 3.1 – Mon projet de recherche sur la question des interactions non-verbales entre marcheurs s’articule autour de 3 axes. Le premier axe vise à dépasser la notion de variables observationnelles qui permettaient de mettre en avant des changements au niveau moteur, que nous avons proposées jusqu’alors, pour mettre en évidence les variables de contrôle utilisées dans la tâche d’évitement de collision. Le second axe vise à poursuivre le développement des plateformes de réalité virtuelle pour développer de nouveaux paradigmes expérimentaux. Enfin, le troisième axe vise à individualiser l’analyse des coordinations visuo-motrices impliquées durant l’interaction entre marcheurs afin de proposer des nouveaux outils de diagnostic et de suivi chez des populations atteintes de pathologies.

d’un point de vue statistique les comportements moteurs ainsi que les effets de différents facteurs sur ces derniers. $mpd(t)$ s’avère être une variable d’intérêt majeur pour décrire les conditions de l’interaction lors du croisement entre deux marcheurs ainsi que les manœuvres mises en place pour éviter la collision. Il est alors envisagé d’aller plus loin dans l’analyse afin de comprendre quelles sont les variables de contrôle impliquées durant l’interaction. Afin d’illustrer les perspectives de travail qui vont dans ce sens, je présenterai trois projets de recherche. Dans un premier temps, il s’agira de mieux définir le risque de collision, caractérisé dans nos études comme un seuil de distance future de croisement. L’étude que nous avons menée face à un écran d’ordinateur nous montre cependant que la notion de temps restant avant l’interaction (MEERHOFF et al., 2018b) couplée à mpd serait un meilleur critère pour définir le risque de collision. Il semble donc fondamental d’approfondir cette question. Le risque de collision est multifactoriel. En

plus d'être défini par les caractéristiques de la situation, il peut être influencé par exemple par la nature des personnes impliquées durant l'interaction en terme de risque physique lié à la collision, autrement dit en regard des conséquences d'une collision. Ainsi, pour élargir la compréhension de cette notion, nous nous intéresserons à l'effet de quelques facteurs, et en particulier le cas où un marcheur interagit avec un véhicule en considérant l'effet de l'asymétrie des interacteurs (une personne sur un fauteuil roulant électrique) mais aussi le rôle de la pratique répétée dans la connaissance des caractéristiques de l'interaction (une voiture autonome). Enfin, que se passe-t-il si le contact a lieu ? Par une approche multimodale, qui considère le fait que l'individu perçoit les interactions à la fois par les systèmes visuels et tactiles et que son mouvement est soit délibéré soit subi par les forces exercées sur lui, nous proposons d'étudier les conséquences des contacts physiques entre individus. Les résultats de ces études permettront de développer de nouvelles métriques pour caractériser les interactions et des connaissances sur les comportements de référence, et pourront être utilisés dans l'axe 2 pour comparaison avec des conditions virtuelles, ou avec des populations spécifiques pour l'axe 3.

L'axe 2, intitulé *"Réalité virtuelle et interactions entre marcheurs"*, vise à poursuivre dans un premier temps les efforts menés pour valider la plateforme expérimentale en réalité virtuelle en considérant l'effet des contraintes matérielles sur les interactions entre marcheurs, en prenant pour exemple l'effet du champ de vision sur les manœuvres d'évitement de collision. Dans un second temps, nos expériences ont considéré des interactions entre un individu et un marcheur virtuel passif et dénué de toute expressivité. Dans un souci d'étudier de manière la plus fidèle les interactions entre un couple de marcheurs, il est nécessaire de développer la plateforme en considérant des humains virtuels réactifs et expressifs, fondamentaux pour apporter toutes les nuances nécessaires à la communication non verbale. Ces nouveaux paradigmes expérimentaux en réalité virtuelle, bénéficieront aux questions de recherches posées dans les axes 1 et 3.

L'axe 3 est intitulé *"Approche individuelle des coordinations visuo-motrices"*. Alors que les deux premiers axes s'inscrivent dans la continuité des travaux déjà menés ce troisième axe est nouveau dans les thématiques considérées. Il ne s'agit plus d'analyser des données moyennes mais plutôt de considérer des données individuelles qui permettront

de développer des applications de diagnostic et suivi cliniques chez des populations spécifiques. Dans ce cadre, il est envisagé de travailler sur deux cas d'étude, les patients douloureux chroniques avec une prise en charge ostéopathique ainsi que les sportifs ayant subi une commotion cérébrale. Les résultats de ces recherches pourront permettre de mettre en place des diagnostics, un suivi ou des évaluations des protocoles de prise en charge innovants.

Ces trois axes structurant mon projet de recherche, caractérisés par des inter-relations fortes, s'inscrivent dans une politique de site locale. La question des interactions entre marcheurs intègre le sous-axe "Interaction Matériels et environnements complexes" de l'axe "Sport-Performance" du laboratoire Mouvement Sport Santé (M2S) et les ressources matérielles nécessaires à la bonne réalisation des paradigmes expérimentaux sont disponibles au laboratoire. Le troisième axe, avec le développement de thématiques plus cliniques s'inscrit en complémentarité avec les travaux d'Armel Crétual et permettent de mettre en place de nouvelles connexions entre les axes Sport-Performance et Sport-Santé du laboratoire. Les applications sur la question des interactions sociales en réalité virtuelle et le développement d'humains virtuels plus réalistes permet des liens forts avec les équipes MimeTIC et Rainbow d'Inria Rennes. Le développement de l'axe 2 sur l'interaction entre un marcheur et un fauteuil roulant s'inscrit dans un projet de chaire du Handicap porté par Marie Babel à l'Insa et, en complément de l'axe 3 sur les applications cliniques, présente un intérêt majeur dans la mise en place de collaboration étroite avec des partenaires comme le Pôle Saint-Hélier ou encore l'Institut d'Ostéopathie. Le développement de tels liens ainsi que les résultats de ces recherches auront un impact positif pour la formation des étudiants du Master Activités Physiques Adaptées Santé dont je suis co-responsable. Ce projet de recherche s'appuie par ailleurs sur des collaborations nationales et internationales, qui permettront un rayonnement et une visibilité du laboratoire et de mes travaux.

Je vais ainsi présenter les détails de ces axes dans les sections suivantes.

3.2 Axe 1 : Des variables observationnelles aux variables de contrôle.

L'objectif majeur de ce premier axe de recherche est d'approfondir les travaux précédemment décrits dans le Chapitre 2 de ce document en visant à mettre en évidence, au-delà des variables qui permettent de décrire statistiquement l'interaction, les variables de contrôle impliquées dans la tâche d'évitement de collision. En particulier, il s'agira de travailler sur la notion de risque de collision mais également de proposer de nouvelles approches multimodales en considérant la notion de contacts physiques.

3.2.1 Risque de collision : distance vs. temps

Selon Cutting et al. (1995), la détection par le système visuel de la collision par le marcheur est un processus en deux étapes, qui vise à savoir si une collision va avoir lieu puis quand cette collision va avoir lieu. Il s'agit donc d'estimer la distance future de croisement, puis le temps restant avant la collision (TTC). Nous avons pu discuter de cette notion au travers la revue de littérature proposée en section 2.1 où nous avons mis en avant que la distance future de croisement n'était pas seulement une distance de contact physique mais tenait compte du fait que le marcheur est un Être social. Le marcheur cherche ainsi à préserver une distance de confort pour les interactions, autrement qualifiée d'espace personnel (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005). Nous avons approfondi la question du critère de distance de croisement en nous intéressant à la variable *mpd*, qui permet à la fois de caractériser les essais pour lesquels un marcheur va adapter son mouvement ainsi que la séquence temporelle de ses adaptations (OLIVIER et al., 2012, 2013). D'autre part, dans le cas des études utilisant un paradigme où les marcheurs arrivent de face, présentant alors un risque systématique de collision future en terme de distance de croisement, les conclusions de Cinelli et Patla (2007) suggèrent que lorsqu'un objet se déplace le long d'un parcours prédéterminé, les individus régulent l'amplitude de leur déviation latérale au moment du croisement afin de maintenir une cohérence dans la vitesse d'approche de l'obstacle. Pour ce faire, les individus modulent la vitesse à laquelle ils évitent l'obstacle (c'est-à-dire que la vitesse d'évitement ML augmente avec la vitesse d'approche de l'obstacle). Cela suggère que plus le risque de collision augmente

(c'est-à-dire plus la vitesse d'approche est élevée), plus l'individu évitera rapidement l'obstacle. Récemment, Pfaff et Cinelli (2018) ont mis en avant que lorsque la trajectoire d'un confédéré était incertaine, les individus utilisaient un critère de TTC cohérent pour déterminer quand changer de trajectoire. Il a été constaté que les hommes évitaient les obstacles beaucoup plus tôt (c'est-à-dire avec un TTC plus important) que les femmes. Cependant, après un changement de trajectoire, le sexe n'avait pas d'impact sur les besoins spatiaux des individus, mais plutôt l'environnement (c'est-à-dire les limites de l'espace expérimental). Enfin, nous avons montré que la combinaison des notions de temps restant avant le croisement (TTCA) et *mpd* serait pertinente pour caractériser le risque de collision (MEERHOFF et al., 2018b). En effet, dans une tâche d'évitement de collision face à un écran d'ordinateur, les marcheurs virtuels regardés et évités étaient les marcheurs visibles avec la combinaison correspondant au plus petites valeurs de TTCA et *mpd*.

Notre premier objectif consiste alors à reconsidérer la notion de risque de collision dans le cas d'un croisement entre deux marcheurs en repensant nos analyses pour prendre en considération le couplage *mpd*-TTCA. En particulier, il s'agira d'identifier le couple *mpd*-TTCA au moment où le marcheur déclenche une manœuvre d'évitement de collision. Pour cela, il semble nécessaire de repenser l'analyse de *mpd(t)*, en proposant un modèle de son évolution pour chaque essai, comme par exemple une fonction linéaire par morceaux, dont le point de transition entre les phases d'observation et de réaction permettrait d'avoir accès à notre couple *mpd*-TTCA (cf figure 3.2) qui nous permettra d'explorer cette notion de risque de collision. Il sera ainsi nécessaire de considérer des situations pour lesquelles la durée entre l'instant où les marcheurs sont en mesure de se voir et l'instant où ils se croisent varie afin d'évaluer si on observe une constance dans la temporalité du déclenchement de l'adaptation du mouvement, en lien avec un seuil de distance future de croisement.

Un deuxième objectif, en collaboration avec Michael Cinelli (Wilfrid Laurier University) visera à étudier la notion d'ordre de passage dans la régulation du risque de collision et en particulier en considérant l'effet de facteurs environnementaux. Dans nos

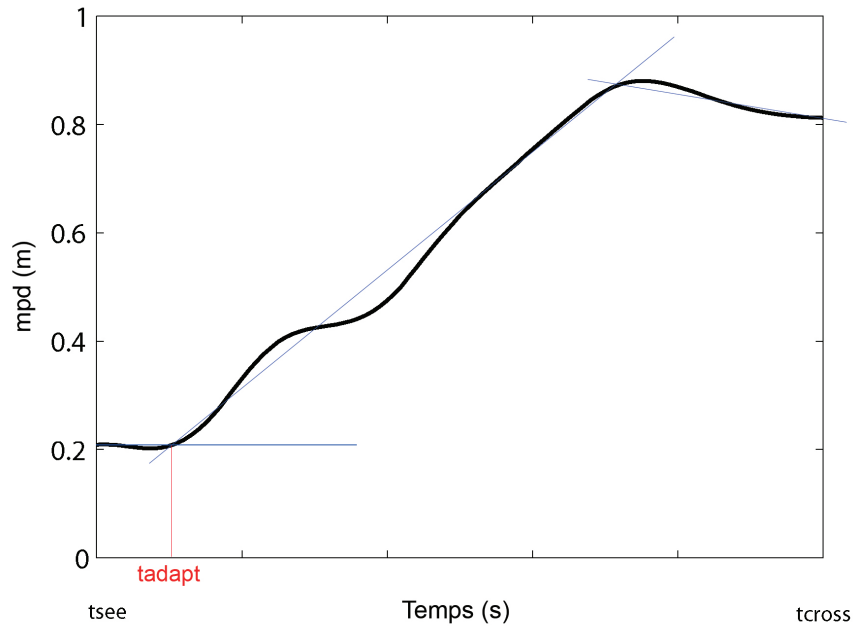


FIGURE 3.2 – Analyse du couplage *mpd*-TTCA durant la tâche d’évitement de collision. En approximation la courbe d’évolution de *mpd* par une fonction linéaire par morceaux, nous souhaitons identifier l’instant d’initiation de l’adaptation de la trajectoire de marche (*tadapt*). Nous pourrions ainsi identifier le couple *mpd*(*tadapt*)-TTCA (défini comme étant le résultat de $t_{cross}-t_{adapt}$) afin d’étudier la notion de risque de collision.

différentes études présentées dans le chapitre 2, nous avons pu mettre en évidence le lien entre l’ordre de passage et le rôle des marcheurs dans l’interaction, et cette préservation de l’ordre de passage entre deux marcheurs jeunes a également été démontrée dans la littérature (KNORR et al., 2016). En fonction des caractéristiques de l’interaction, nous avons aussi pu voir que l’ordre de passage était parfois inversé par rapport à l’ordre théorique initial. Nous souhaitons ainsi développer une tâche d’évitement de collision entre deux marcheurs face à face avec une porte située sur le chemin, à l’image de la tâche proposée par Cinelli et Patla (2007). Nous manipulerons la position de la porte afin de développer des situations où le croisement théorique s’effectue au niveau de la porte, avant ou après cette dernière. Nous faisons l’hypothèse que les marcheurs utilisent les informations liées au TTC pour déterminer qui va franchir la porte en premier afin de mettre en place des stratégies de modification de mouvement adaptées.

3.2.2 Risque de collision et risque physique : interaction entre un marcheur et un véhicule

La seconde partie de mon projet de recherche concernant l'axe 1, vise à aborder la notion de risque de collision en considérant la notion de risque physique, en d'autres termes, les conséquences d'une collision sur l'intégrité physique du marcheur. Pour cela, l'approche consiste à considérer des situations asymétriques en terme d'interacteurs, par exemple dans le cas où un marcheur va interagir avec un véhicule. Je présenterai deux exemples illustratifs. Nous souhaitons considérer d'une part le cas de l'interaction entre un marcheur et une personne sur un fauteuil roulant électrique, en explorant notamment les questions de proxémie et de forme de l'espace personnel dans une telle situation. D'autre part, nous étudierons la question de l'apprentissage de l'interaction en considérant l'effet de la pratique répétée de traversée de rue face à un véhicule autonome.

Interaction entre un marcheur et une personne sur un fauteuil roulant électrique

Le cas d'étude de l'interaction entre un marcheur et un Fauteuil Roulant Electrique (FRE), en comparaison avec l'interaction entre deux marcheurs vise à étendre la compréhension de la notion du risque physique de collision mais possède des liens forts avec l'axe 2, détaillé ci-après, étant données les applications de ces résultats pour le développement de fauteuils autonomes et de simulateurs de conduite. En effet, la conduite d'un FRE n'est pas une tâche triviale. Elle nécessite à la fois des capacités motrices, sensorielles et cognitives suffisantes pour conduire de façon efficace et sécuritaire dans toutes les situations de la vie quotidienne (PELLICHERO et al., 2019). En particulier, la navigation en ville, dans un environnement complexe et dynamique, peut s'avérer trop difficile à appréhender pour un usager de FRE qui cessera alors progressivement de sortir de chez lui (TORKIA et al., 2015).

Le développement de fauteuils roulants intelligents représente ainsi un enjeu sociétal majeur : proposer une assistance robotique contribue ainsi à (re)gagner une indépendance nécessaire à l'estime de soi (LEAMAN et LA, 2017). Toutefois, la question de l'apprentissage de la conduite reste une problématique forte pour les équipes cliniques prescriptrices

de FRE. Ce projet de recherche s'inscrit alors dans le cadre d'une collaboration avec les équipes Rainbow/IRISA et du centre de médecine physique et de réadaptation du Pôle Saint Hélier grâce à un projet de thèse financé par le pôle Saint-Hélier et dont la doctorante, Emilie Leblong est médecin au service de médecine physique et de réadaptation (neurologie). Dans le cadre du projet Interreg ADAPT, ces équipes ont conçu un simulateur de conduite de FRE en réalité virtuelle (VAILLAND et al., 2020). Ce simulateur multisensoriel reproduit les sensations haptiques, vestibulaires, visuelles et auditives rencontrées lors d'une navigation avec un FRE réel : la navigation dans un environnement virtuel permet ainsi d'évaluer et améliorer les performances de conduite, tout en sécurisant l'apprentissage.

Pour favoriser le transfert de compétences du virtuel au réel (en lien fort avec l'axe 2 de mon projet), l'utilisation d'une plateforme de ce type requiert entre autres le déploiement d'environnements virtuels interactifs écologiques, c'est-à-dire étant capables de mettre l'individu en situation d'interaction dans des situations les plus proches du quotidien. A l'heure actuelle, les simulateurs incluent des environnements virtuels non peuplés. Pourtant, dans le cadre d'une mobilité urbaine inclusive, la question de l'interaction sociale est prépondérante. Comprendre en amont comment les piétons et les usagers de FRE interagissent favorise ainsi la conception d'une part d'outils de navigation sociale assistée et d'autre part d'environnement virtuel réalistes. Les modèles d'interactions se basent classiquement sur des modèles d'interaction statique. Typiquement, des solutions robotiques ont été proposées pour approcher un groupe (NARAYANAN et al., 2016), ou manœuvrer dans un environnement peuplé d'humains (ALI et al., 2019). Ces travaux proposent d'inférer la position des personnes, de prédire leur trajectoire sans toutefois prendre dans son ensemble les conventions sociales en situation dynamique. D'autres études se sont intéressées à la manière dont une personne en fauteuil s'adaptait à son environnement. Ces études ont considéré l'interaction avec un environnement statique sur les questions du contrôle visuo-moteur de la tâche de passage par une ouverture (HIGUCHI et al., 2009 ; RODRIGUES, GALVÃO et GOTARDI, 2014), lors d'un changement de direction (CHARETTE, ROUTHIER et MCFADYEN, 2015) ou du contournement

d'un obstacle fixe (CHARETTE, ROUTHIER et MCFADYEN, 2017). La problématique des capacités d'adaptation des piétons vis-à-vis des usagers de fauteuils roulants en mouvement et de ces usagers de fauteuil vis à vis des piétons, n'est donc pas encore totalement résolue.

Nous avons déjà pu mettre en place une tâche de croisement à 90° entre un piéton et une personne sur un FRE qui nous a permis de mettre en évidence quelques résultats préliminaires. En particulier, nous avons montré que le piéton, même s'il était sensé passer premier au croisement avec jusqu'à presque 1m d'avance laissait passer le fauteuil et que les distances de croisement étaient plus grandes lorsque le piéton passait premier.

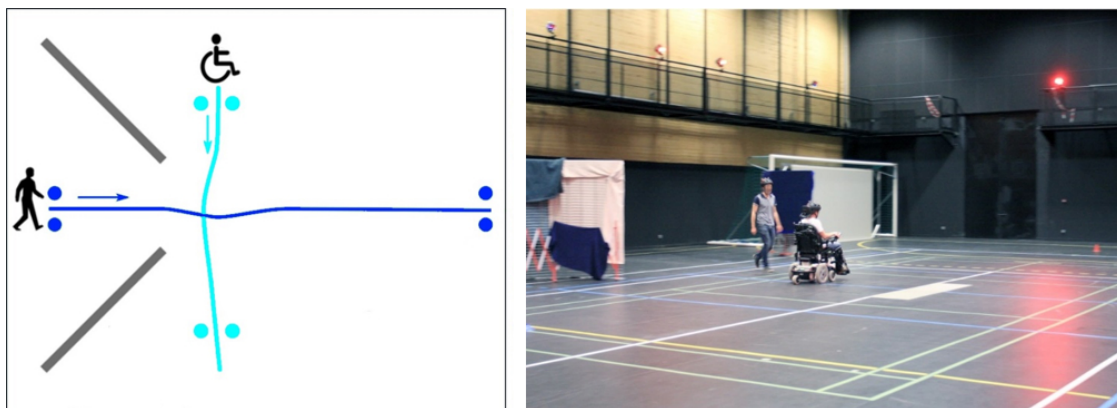


FIGURE 3.3 – Protocole de croisement entre un piéton et une personne conduisant un fauteuil roulant électrique.

Nous faisons ainsi l'hypothèse que la différence de nature entre un FRE et un piéton provoque des comportements différents d'une interaction piéton-piéton. Cette asymétrie des interacteurs pourrait provoquer une différence dans le risque physique perçu de collision, induisant de ce fait des différences dans les stratégies mises en place par rapport à des interactions piéton-piéton.

Nous nous sommes fixés trois objectifs dans ce projet. Le premier objectif vise à caractériser l'asymétrie des comportements d'interaction dans le cas d'un évitement de collision entre FRE et piéton en comparaison avec une interaction piéton-piéton. En particulier, il s'agira d'évaluer et de modéliser les normes sociales de proxémie

piéton-fauteuil. Ces nouveaux modèles de proxémie seront alors utilisés dans le cadre de la conception du simulateur de conduite de fauteuil roulant et des environnements dynamiques. Le second objectif consistera ainsi à évaluer la fidélité de la réalité virtuelle par rapport aux situations réelles. La perception du risque devra être vérifiée, de façon à reproduire les sensations du réel sur simulateur : les données collectées en réel serviront de référence pour la comparaison avec les situations virtuelles. On voit ici le lien fort avec l'axe 2 de mon projet sur la question de l'évaluation des plateformes de réalité virtuelle. Cette étape, fondamentale, est nécessaire pour améliorer le comportement du simulateur en vue de réaliser des tâches écologiques. Ainsi, le troisième objectif de cette thèse est d'évaluer les bénéfices de l'apprentissage de la conduite sur simulateur vis-à-vis d'un apprentissage traditionnel. Ce nouvel outil pourrait alors être utilement proposé dans le cadre d'un protocole d'apprentissage hybride.

Ces travaux s'appuieront sur 3 études expérimentales, en collaboration avec le laboratoire CIRRIIS de l'Université Laval de Québec. La première étude cherchera à caractériser l'espace personnel du point de vue à la fois du piéton et du conducteur de FRE. Pour ce faire, un protocole de croisement similaire à celui présenté dans l'étude de Gérin-Lajoie et al. (GÉRIN-LAJOIE, RICHARDS et MCFADYEN, 2005) et dédié à l'interaction piéton-piéton sera reproduit dans le cas d'une interaction piéton-fauteuil. Des utilisateurs experts de FRE seront invités à participer à cette évaluation. Les paramètres biomécaniques, psychosociaux et sociétaux seront en particulier étudiés. La seconde étude reproduira le protocole de croisement en environnement virtuel afin de valider les performances d'immersivité et de fidélité du simulateur pour reproduire les interactions FRE-piétons relativement aux situations d'interactions simples. Le simulateur existant sera alors mis à jour sur la base des conclusions obtenues par les études précédentes afin de mener une troisième étude clinique visant à évaluer l'usage de ce simulateur pour l'apprentissage de la conduite de FRE.

Traversée de route et véhicules autonomes

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec l'Université Gustave Eiffel (ex IFSTTAR), et est financé sous le nom du projet AUTOMA-PIED 2 (porté par

l'Université Gustave Eiffel) par la Direction de la Sécurité Routière. Il fait suite au projet AUTOMA-PIED, financé entre 2018 et 2020 et concerne le grand thème de l'interaction entre un marcheur et un véhicule autonome en comparaison avec l'interaction avec un véhicule traditionnel dans des tâches de traversée de rue.

La question des piétons reste depuis plusieurs années un enjeu prioritaire de sécurité routière. Les bilans de l'ONISR 2019 rapportent une mortalité piétonne de 14% en 2017 et 15% en 2018. Bien qu'une diminution de la mortalité des piétons est observée depuis les années 2000, en lien avec les mesures prises sur l'aménagement des infrastructures et la réduction de la vitesse des automobilistes, la part de la mortalité piétonne reste élevée, avec 484 piétons tués en 2017 et 475 en 2018. En particulier, les chiffres mettent en avant une mortalité piétonne importante en agglomération, lors de traversée de rue, et le plus souvent en dehors d'un passage piéton. Les bilans font également état d'une forte représentation des personnes âgées de plus de 75 ans dans les accidents piétons. En 2017, les plus de 75 ans représentaient 36% des tués, pour seulement 9% de la population française. Dans ce cadre, les constructeurs automobiles développent des aides à la conduite automobile (ex. ABS, régulateur de vitesse) afin d'augmenter la sécurité et la facilité de conduite (BENGLER et al., 2014). Les systèmes développés ont maintenant atteint un tel niveau de complexité que le véhicule automatisé devient progressivement une réalité, grâce à des capteurs (du type laser, radar, caméra) et algorithmes capables de percevoir, comprendre et agir par eux-mêmes. Un des arguments phares à ces développements est que les véhicules automatisés permettraient d'observer une baisse drastique du nombre d'accidents. Mais cette réduction pourrait se faire attendre, car malgré l'évolution rapide des technologies, la transition vers cette nouvelle forme de mobilité risque d'être ralentie par le renouvellement du parc automobile. Avant que son renouvellement soit complet, les véhicules traditionnels sans délégation de conduite cohabiteront avec des véhicules partiellement ou totalement automatisés. Dans cette période mixte, les usagers de la route seront confrontés à de nouvelles pratiques de conduite, qui même si elles sont programmées pour être sécuritaires et respectueuses du code de la route, pourraient donner lieu à des comportements non sécuritaires en retour. Plusieurs auteurs craignent un effet de « compensation » (SPARROW et HOWARD, 2017), avec l'idée que les autres

usagers de la route compenseraient la sécurité accrue des véhicules à conduite déléguée en augmentant leurs prises de risque et en adoptant des comportements agressifs. Ces comportements nuiraient à la fluidité du trafic et pourraient être un frein à l'introduction des véhicules automatisés. Il est important alors de mieux connaître les bénéfices et risques encourus avec l'introduction de tels véhicules pour l'ensemble des usagers de la route.

Si de plus en plus d'études sont menées sur la question des interactions entre piétons et véhicules automatisés, ces travaux restent peu nombreux et sources de contradictions. Sur la base des connaissances actuelles, déterminer si les interactions piétons-véhicules seront mises à mal avec l'introduction des véhicules automatisés sur nos routes ne trouve pas de réponses claires, en particulier pour la sécurité des traversées de rue. La littérature publiée sur ce sujet montre, que les piétons manifestent des sentiments, perceptions ou comportements face à des véhicules automatisés parfois positifs et sûrs (BOTELLO et al., 2019; HULSE, XIE et GALEA, 2018; PALMEIRO et al., 2018), mais parfois aussi hésitants (HABIBOVIC et al., 2016; ROTHENBÜCHER et al., 2016; VELASCO et al., 2019), ou encore, dans certaines études, non différents comparativement à ceux adoptés face à des voitures traditionnelles (DEY et al., 2019; PALMEIRO et al., 2018). Certaines études montrent par contre des comportements problématiques et potentiellement dangereux, comme celui de tester la capacité de freinage du véhicule automatisé en se jetant devant le véhicule ou en poussant des amis (CURRANO et al., 2018) ou encore de s'engager au dernier moment en supposant que le véhicule s'arrêtera (MADIGAN et al., 2019; WOODMAN et al., 2019). La très récente étude de Rad et al. (2020) observe également cette plus forte propension des piétons à traverser face à un véhicule automatisé plutôt que traditionnel, mais elle suggère surtout que les caractéristiques personnelles des piétons (âge et familiarité avec ce type de véhicule) pourraient jouer un rôle important. Il ressort également de la littérature le constat que, pour traverser la rue, le piéton s'appuie essentiellement sur sa perception de la dynamique et du comportement de conduite du véhicule à l'approche, qu'il soit automatisé (PALMEIRO et al., 2018; RAD, ALMEIDA CORREIA et HAGENZIEKER, 2020) ou non (ACKERMANN et al., 2019; DEY et al., 2019). Pour décider s'il peut ou non traverser, le piéton détermine le temps

disponible (dépendant de l'intervalle le séparant du ou des véhicule(s) à l'approche), et le confronte au temps qui lui est nécessaire pour traverser (qui dépend de facteurs environnementaux comme la largeur de la voie et de facteurs personnels comme sa vitesse de marche). Beaucoup de travaux ont été menés à ce sujet, sur simulateur (DOMMES et al., 2014) ou en situation réelle (ZHUANG et WU, 2012), montrant notamment que la décision de traversée est affectée par l'âge du piéton ou encore la vitesse des véhicules à l'approche (DOMMÈS, 2019).

Dans ce contexte, le projet AUTOMA-PIED avait mis en évidence que dans le cas d'un trafic mixte, lorsqu'un véhicule automatisé laisse le passage en première voie d'une route bidirectionnelle alors que des véhicules traditionnels approchent en deuxième voie, les piétons saisiraient l'opportunité offerte par le véhicule automatisé en voie proche sans suffisamment considérer la voie éloignée où approchent des véhicules traditionnels. Ce risque s'est manifesté chez les participants jeunes comme âgés, mais en plus forte proportion chez les âgés, et plus particulièrement encore à vitesse élevée d'approche des véhicules. Le deuxième résultat important est celui d'une méfiance dans le cas d'une traversée face à un véhicule automatisé dans chaque voie, manifestée par des initiations tardives et des temps de traversée longs, notamment lorsque les véhicules automatisés enclenchent leur freinage brusquement à faible distance. Le projet s'était par ailleurs intéressé aux indices du mouvement segmentaire qui pourraient permettre de prédire l'intention de traverser la rue, montrant que le mouvement de la tête sur l'axe antéropostérieur serait le marqueur le plus intéressant, contrairement au mouvement de rotation sur le plan horizontal. Le projet AUTOMA-PIED 2 s'inscrit dans la continuité de AUTOMA-PIED et vise à approfondir ses résultats en s'intéressant au rôle de la pratique répétée dans les connaissances du piéton quant aux interactions à attendre avec un véhicule automatisé, dans l'établissement de sa confiance envers ce nouveau véhicule, et dans la sécurité de ses comportements de traversée de rue (qualité des décisions, mouvements d'initiation et marche). En effet, nos résultats peuvent être liés au manque de pratique et de connaissances : que les participants aient confiance ou non, prennent des risques ou non, ils n'ont jamais été auparavant confrontés à des véhicules automatisés. Ils répondent,

à un instant t , à une série d'essais d'une vingtaine de minutes seulement. Le véhicule automatisé est par ailleurs toujours signalisé et très facilement reconnaissable dans le trafic (véhicule blanc, avec un lidar sur le toit et des écriteaux mentionnant la conduite autonome sur sa carrosserie). Les résultats sont donc à nuancer par le manque d'expérience des participants, ainsi que par la haute détectabilité du véhicule. Or, la confiance s'établit dans le temps et avec la pratique. La connaissance du piéton envers le véhicule automatisé circulant face à lui, sa perception et sa compréhension du fonctionnement du véhicule et de son comportement, jouent un rôle important que le projet AUTOMA-PIED 2 propose d'approfondir. Dans le cadre de mon projet de recherche, je souhaite envisager la notion du risque de collision, non seulement par les caractéristiques de la situation et les capacités d'action des marcheurs, mais également par leurs connaissances du comportement des véhicules en interaction.

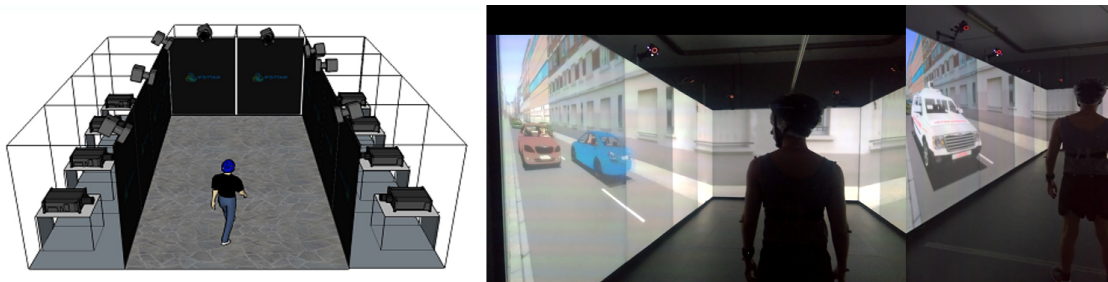


FIGURE 3.4 – Illustration du simulateur piéton utilisé à l'Université Gustave Eiffel (site de Versailles Satory) et de la situation de traversée de rue face à un véhicule traditionnel ou un véhicule autonome.

Afin de répondre à cet objectif, nous conduirons une étude expérimentale sur le simulateur de traversée de rue de l'Université Gustave Eiffel à Versailles Satory (cf. figure 3.4). Il permet le déplacement réel du piéton dans un environnement urbain virtuel sur une distance de plus de 8 mètres. Le piéton sera placé dans une situation de traversée de rue non réglementée par un passage piéton ou des feux. Il devra, à chaque essai, traverser (ou non) au moment qui lui semble opportun, selon différentes conditions de trafic (véhicule autonome ou traditionnel, vitesse d'approche et temps pour traverser). Plusieurs séances individuelles seront envisagées, avec un intervalle de 1 à 2 mois entre chaque, pour étudier l'effet de la pratique répétée.

3.2.3 Approche multimodale des contacts physiques

Alors que les deux premières parties de ce premier axe de recherche concernent la notion de risque de collision, la troisième partie s'intéresse au cas où une collision a effectivement lieu. Elle s'inscrit dans le cadre du projet européen CrowdDNA dont les principes fondamentaux sont illustrés sur la figure 3.5 gauche.

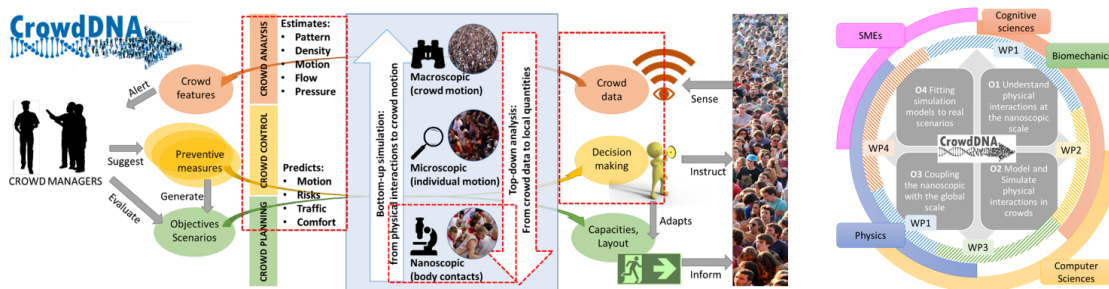


FIGURE 3.5 – Gauche : Architecture du projet CrowdDNA qui cherche à faire le lien entre les comportements microscopiques et macroscopiques de la foule afin de proposer une gestion des foules efficace dans le but de garantir la sécurité des individus et leur assurer plus de confort dans les foules denses. Droite : Les 4 objectifs du projet seront adressés grâce à une approche multidisciplinaire à l'interface des sciences cognitives, de la biomécanique, de l'informatique, de la physique.

CrowdDNA est particulièrement intéressé par les dangers et inconforts associés à des foules de très grande densité telles que celles qu'on peut rencontrer dans les événements sportifs ou culturels, ou encore dans le système de transport public. Faire partie d'une foule large et dense en mouvement et en synergie, à l'image d'un concert, peut s'avérer être une expérience plaisante mais peut rapidement se transformer en une expérience traumatique lorsque la proximité s'exprime tout d'abord par des contacts physiques inconfortables, puis des forces de poussée et enfin des mouvements de foule incontrôlés. Plusieurs exemples de mouvements de foules meurtriers ont marqué l'histoire, comme ceux du stade de Hillsborough à Sheffield en Angleterre en 1989, de la Love Parade à Duisbourg en Allemagne en 2010, ou encore de la Mecque en Arabie Saoudite en 2015. Le problème majeur rencontré pour la gestion des foules est le manque d'outils pour prédire le comportement des foules ainsi que les effets des décisions prises pour la gestion des foules (HELBING et MUKERJI, 2012).

Il existerait ainsi un point de transition à partir duquel une proximité trop forte entre les individus les prive de leur habileté à bouger librement. Ils peuvent être transportés sur plusieurs mètres sans toucher le sol, tomber, être piétinés, ou encore suffoquer sous la pression. Ces phénomènes ne sont ni intentionnels ni contrôlables. Ils émergent et résultent de comportements individuels qui se traduisent en comportement collectif. En analysant le comportement des foules, il s'agit alors de comprendre l'état courant de la foule et de prédire son évolution. L'idée sous-jacente est que l'analyse de caractéristiques macroscopiques (globales) de la foule, à l'image du champ de mouvement apparent peut renseigner sur la structure interne de la foule au niveau microscopique (local), et permettre de prédire le potentiel à générer des mouvements de foule dangereux. Le défi scientifique majeur consiste alors à comprendre les relations entre les comportements de foule à l'échelle microscopique (e.g., contacts individuels au niveau segmentaire) avec les comportements macroscopiques, au niveau de la foule dans sa globalité. Les 4 objectifs du projet, illustrés sur la figure 3.5 droite, sont alors les suivants : 1) Comprendre les interactions physiques entre individus dans une foule au niveau local 2) Modéliser et simuler ces interactions locales, 3) Faire le lien entre les comportements locaux et le comportement global de la foule 4) Comparer les simulations à des données issues de scénarios de foules réels.

Dans le cadre de mon projet de recherche, qui s'appuie sur la collaboration locale avec Julien Pettré, Ludovic Hoyet et Charles Pontonnier et notamment le co-encadrement d'une thèse qui débutera en novembre 2020, la partie pour laquelle je souhaite orienter mes efforts concerne la compréhension des interactions physiques locales entre individus dans une foule. Très peu de travaux ont porté sur la question des contacts physiques entre individus. On retrouve à ce jour quelques exemples dans le cas du plaquage au rugby (HENDRICKS, KARPUL et LAMBERT, 2014), de l'animation de poussées plausibles d'humains virtuels (HOYET, MCDONNELL et O'SULLIVAN, 2012), de la manière de se frayer un chemin dans une foule dense (METIVET, PASTORELLO et PEYLA, 2018) ou encore pour la conception d'exosquelette (KOPITZSCH, CLEVER et MOMBAUR, 2017). Très récemment, Wang et al. (2020) se sont intéressés à la perception qu'ont des individus des contacts physiques. Les participants devaient noter sur une échelle de 1 à 5 le niveau

de risque perçu en fonction de différentes conditions pour lesquelles les auteurs faisaient varier l'intensité des forces exercées sur ces derniers (au niveau du buste) et leur durée. Les auteurs mettent en lien les forces exercées sur le buste avec le risque de mort par asphyxie. Les résultats montrent que le concept de risque perçu doit tenir compte de différences individuelles et que la transition entre les zones de risque ne correspond ainsi pas à une seule valeur numérique mais plutôt à un intervalle. De nombreuses questions restent alors en suspens et l'étude des contacts physiques entre personne demeure ainsi un champ de recherche large à explorer. En particulier, nous souhaitons porter notre attention sur les transferts d'énergie cinétique lors des poussées et contacts physiques entre individus. Plusieurs facteurs seront à considérer comme l'intensité du contact, l'orientation des forces, les surfaces en contact, la localisation des contacts, le fait que les contacts soient prévisibles ou non. Les caractéristiques de l'environnement entourant l'individu seront également à prendre en compte. En effet on peut s'attendre à des stratégies différentes d'adaptation de mouvement selon qu'il y ait un mur ou d'autres personnes à proximité de l'individu poussé. En lien avec la question des transferts d'énergie cinétique, nous nous intéresserons à la manière avec laquelle les individus réagissent à de tels contacts en s'intéressant aux questions de la génération de forces internes (MULLER, PONTONNIER et DUMONT, 2018 ; MULLER et al., 2019) pour préserver leur équilibre. Afin de répondre à ces questions nous mènerons une série d'expérimentations impliquant des tâches de poussées entre individus équipés de capteurs de mouvement, de capteurs de pression au niveau des zones de contact et nous utiliserons des plateformes de forces sous les pieds des participants. Ces données nous permettront de développer des modèles qui permettront d'estimer les transferts d'énergie cinétique sous différentes conditions. Il s'agira ensuite de valider la précision et la performance de ces modèles en évaluant leur capacité à reproduire des comportements réalistes en comparaison avec les données réelles.

Le développement de ce sous-axe de recherche apparaît comme fondamental pour faire évoluer ma recherche sur les interactions entre piétons en développant une approche sur les aspects multimodaux de l'interaction, mettant en jeu le sens tactile, ce qui nécessite d'aller plus loin dans les modèles en considérant des approches mécaniques et musculo-squelettiques, en complément au sens visuel au profit de la préservation de l'équilibre.

3.3 Axe 2 : Réalité virtuelle et interactions entre marcheurs.

Alors que le premier axe de recherche s'inscrit dans la compréhension des fondements des interactions entre marcheurs, le deuxième axe de recherche vise à poursuivre nos efforts sur le développement de plateformes expérimentales utilisant la réalité virtuelle afin d'évaluer leurs atouts et limites pour interpréter au mieux les résultats obtenus, évaluer leur transférabilité aux situations réelles et proposer de nouveaux paradigmes expérimentaux basés sur de telles technologies. Deux projets sont alors proposés. Le premier vise à poursuivre l'évaluation des dispositifs immersifs. Un exemple de cas applicatif concerne la meilleure compréhension de l'effet de la restriction du champ de vision sur le comportement d'évitement de collision, puisque ce facteur est souvent avancé par les auteurs pour expliquer les différences entre les conditions réelles et virtuelles. Le second s'intéresse quant à lui à de nouvelles thématiques en lien avec le caractère réactif et expressif des humains virtuels qui vont peupler l'environnement virtuel avec lequel un individu va interagir. En effet, pour des soucis de reproductibilité et de contrôle des expérimentations, nous avons choisi jusqu'à présent de contrôler le mouvement des humains virtuels de telle sorte que ces derniers soient passifs, suivant un mouvement prédéfini qui ne tient pas compte des réactions de l'individu. L'étape de création d'humains virtuels interactifs semble donc essentielle pour développer notre plateforme.

3.3.1 Évaluation des dispositifs immersifs

Afin d'illustrer un exemple de cas d'étude concernant l'évaluation des dispositifs immersifs je vais détailler un projet d'étude de l'effet de la restriction du champ de vision sur les comportements d'évitement de collision. Ce projet s'inscrit dans le cadre des travaux menés au sein de l'équipe associée Inria BEAR et plus particulièrement dans le cadre d'une collaboration avec Michael Barnett-Cowan (Waterloo University).

En raison de leurs coûts de plus en plus abordables, et des possibilités de mouvement offertes à l'utilisateur, de plus en plus d'auteurs utilisent les casques de réalité virtuelle pour mettre en place des expériences immersives dédiées à l'analyse du comportement

humain. Néanmoins, le champ de vision offert par ces casques est typiquement de 90-100° en horizontal, 90-100° en vertical et 100-120° en diagonale, avec cependant des nouveaux modèles possédant un champ de vision d'environ 200° en diagonale (BUCK, YOUNG et BODENHEIMER, 2018 ; CUERVO, CHINTALAPUDI et KOTARU, 2018). En comparaison, le champ de vision humain est d'environ 200° en horizontal et 150° en vertical (WERNER, 1991).

De nombreuses études ont été réalisées pour évaluer les effets des caractéristiques du champ de vision en réalité virtuelle sur le sentiment de présence (CUMMINGS et BAIENSON, 2016 ; LIN et al., 2002), la perception de la taille (KELLY, CHEREP et SIEGEL, 2017) et de la distance (BUCK, YOUNG et BODENHEIMER, 2018 ; KELLY, CHEREP et SIEGEL, 2017 ; MURGIA et SHARKEY, 2009 ; WILLEMSSEN et al., 2009), la performance lors de tâche d'atteinte (CAMPORESI et KALLMANN, 2015) (reaching task) ou encore sur le mal des simulateurs (LIN et al., 2002). Néanmoins très peu de travaux se sont intéressés à l'effet de la restriction du champ de vision dans des tâches de locomotion et d'évitement de collision en réalité virtuelle. On peut noter l'étude de Hassan et al. (2007) dans laquelle les auteurs ont demandé à des participants, qui portaient un casque de réalité virtuelle, d'atteindre le plus vite possible un but dans une forêt virtuelle encombrée d'obstacles statiques, sous différentes conditions de champ de vision. Les auteurs ont alors montré que la performance de marche (vitesse, nombre de collision) diminue avec la réduction de la taille du champ de vision, et ceci d'autant plus que le contraste est faible. Les autres études ont été menées en réel. Elles montrent par exemple que des patients avec une diminution de la vision périphérique présentent des difficultés à naviguer sans entrer en collision avec des obstacles statiques ou d'autres piétons (GERUSCHAT et TURANO, 2002 ; PELI et al., 2016). D'autres études ont proposé de manipuler le champ de vision de sujets sains marchant dans un environnement encombré d'obstacles statiques. Dans ce cadre, il a été montré qu'en comparaison avec un champ de vision non limité, une taille de champ de vision intermédiaire ($80^{\circ} \times 60^{\circ}$) entraînait des trajectoires de marche plus larges autour de l'obstacle, sans pour autant modifier la vitesse de marche ni la largeur des pas (JANSEN, TOET et WERKHOVEN, 2011). En revanche, dans le cas d'un champ de vision

faible ($40^{\circ} \times 25^{\circ}$), les marcheurs diminuaient leur vitesse de marche et augmentaient la largeur de pas de telle sorte à augmenter la distance de croisement avec les obstacles. De manière intéressante, les auteurs ont aussi montré l'importance de la distinction entre les caractéristiques du champ de vision horizontal et vertical. Par exemple, si on demande à des individus de marcher sur un sol présentant des surfaces irrégulières, la restriction du champ de vision vertical vers le bas entraîne une diminution de la vitesse de marche et une augmentation de l'inclinaison de la tête vers le bas (MARIGOLD et PATLA, 2008). Dans ce sens, il a été également mis en évidence que la restriction du champ de vision vertical et horizontal augmente le temps nécessaire pour naviguer dans un environnement encombré mais seule la restriction du champ de vision vertical entraîne des mouvements additionnels de la tête (JANSEN, TOET et DELLEMAN, 2010). La question de l'étude des effets de la restriction du champ de vision dans une tâche d'évitement de collision entre marcheurs en réalité virtuelle est donc un champ d'étude encore ouvert et la distinction entre champ de vision horizontal et vertical apparaît comme un point fondamental à prendre en compte dans les analyses.

La compréhension du rôle du champ de vision dans les interactions entre marcheurs est également importante lorsqu'on considère le rôle de la représentation du corps de l'individu en réalité virtuelle et son effet sur l'évitement de collision. Par exemple il a été mis en avant en réel que les informations provenant du champ de vision vertical vers le bas au sujet de la jambe en relation avec la position de l'obstacle étaient essentielles à l'évitement de collision et au contrôle des membres inférieurs (MARIGOLD et PATLA, 2007, 2008). Une réduction du champ de vision peut alors modifier la perception du corps de l'individu et potentiellement de ses mouvements. Il a aussi été montré que la présence d'un corps en réalité virtuelle, soit son propre corps, soit celui d'un autre ou celui d'un humain virtuel influence le sentiment de présence (LIN, ABI-RACHED et LAHAV, 2004; SLATER et al., 2010), les symptômes liés au mal des simulateurs (LIN, ABI-RACHED et LAHAV, 2004), l'estimation de la taille (LINKENAUER et al., 2013) et des distances (LINKENAUER, BÜLTHOFF et MOHLER, 2015; MCMANUS et al., 2011; MOHLER et al., 2010), le coût cognitif (STEED et al., 2016) mais aussi la manière dont

un utilisateur réalise un mouvement d'atteinte (CAMPORESI et KALLMANN, 2015). Il est également à noter que la représentation sous forme d'un corps réaliste ne soit pas un facteur critique dans la préservation du sentiment de possession du corps (LUGRIN, LATT et LATOSCHIK, 2015), mais que des différences inter-sexe existent avec par exemple les hommes qui préfèrent préserver une texture photo-réaliste alors que les femmes préfèrent préserver leur propre forme de corps (THALER et al., 2018).

Afin d'étudier l'incidence des contraintes matérielles des outils de réalité virtuelle sur les interactions entre marcheurs, nous proposons alors un premier cas applicatif visant à étudier le rôle des dimensions du champ de vision, ainsi que la disponibilité des indices visuels concernant le propre corps du marcheur en réel et en virtuel dans une tâche d'évitement de collision entre marcheurs. Les limitations verticales et horizontales du champ de vision seront étudiées. Pour cela, il s'agira de mettre en place des situations de croisement entre piétons en réel et en virtuel et d'analyser le mouvement de marche ainsi que les mouvements des yeux des participants. Afin que les conditions soient les plus comparables en dehors des facteurs manipulés, les participants devront porter pour chaque condition la combinaison de capture de mouvement Xsens ainsi que le sac à dos avec l'ordinateur intégré, qui sont utilisés en réalité virtuelle. Les conditions considérées seront alors les suivantes :

— Condition réelle

- Condition de référence : Champ de vision complet + Oculomètre + Xsens + sac à dos
- Champ de vision correspondant à celui du casque de réalité virtuelle + Oculomètre + Xsens + sac à dos
- Champ de vision correspondant à celui du casque de réalité virtuelle mais portion verticale basse disponible + Oculomètre + Xsens + sac à
- Champ de vision complet mais portion verticale basse non disponible + Oculomètre + Xsens + sac à dos

— Condition virtuelle

- Casque de réalité virtuelle avec oculomètre intégré + représentation du corps + Xsens + sac à dos
- Casque de réalité virtuelle avec oculomètre intégré + aucune représentation du corps + Xsens + sac à dos

Afin d'être le plus rigoureux possible, il s'agira de restreindre le champ de vision en réel, en se basant sur des mesures individuelles des champs de vision effectifs dans le casque. La comparaison des comportements d'évitement de collision en réel et en virtuel nous permettra ainsi de mieux comprendre l'influence du champ de vision dans le contrôle de cette tâche et ainsi de pouvoir mieux prendre en compte les biais possibles introduits par la réalité virtuelle. Ces réponses sont fondamentales pour transposer nos résultats du réel au virtuel.

3.3.2 Vers des humains virtuels réactifs et expressifs

Ce deuxième projet de l'axe 2 vise à améliorer le réalisme de nos plateformes de réalité virtuelle en développant des humains virtuels réactifs et expressifs, pour interagir avec des marcheurs réels. En dotant les humains virtuels de ces caractéristiques de réactivité et d'expressivité, nous souhaitons produire des interactions entre un individu et un humain virtuel fidèles aux interactions observables en réel mais également d'augmenter le sentiment de présence durant l'expérience immersive. Ce sentiment de présence correspond au sentiment de faire corps avec l'environnement virtuel (SCHUEMIE et al., 2001). Il est influencé par plusieurs facteurs dont les réponses appropriées de l'humain virtuel face aux actions de l'utilisateur (GARAU et al., 2005). Ce projet s'intègre dans le contexte du projet européen H2020 PRESENT qui réunit des acteurs de l'animation graphique, de la réalité virtuelle, et de la création de contenus en vue de créer une nouvelle génération d'acteurs virtuels de haute fidélité capables d'interagir avec des utilisateurs dans le cadre d'applications en réalité virtuelle. Ce projet s'appuie également sur deux thèses (Adèle Colas que je co-dirige, et Alberto Jovane avec lequel je collabore, les deux thèses bénéficiant des co-encadrements de Julien Pettré, Ludovic Hoyet, Marc Chritie et Claudio Pacchierotti) ainsi qu'un financement "Stratégie d'Attractivité Durable" de

la région Bretagne que j'ai obtenu afin de financer un post-doctorant pour deux ans à partir de novembre 2020.

Dans le cas d'étude qui concerne ce deuxième axe de recherche, nous souhaitons nous focaliser sur les questions de la réactivité et l'expressivité liées à la communication non-verbale. La communication non-verbale fait référence à un échange entre individus qui n'utilise pas le langage parlé, et dont l'objectif est de partager du sens avec les autres. Elle ne repose pas sur des mots mais plutôt sur une variété de signaux tels que les gestes, les attitudes, les expressions faciales, le contact visuel, le toucher, les postures et les mouvements corporels. De nombreux domaines sont intéressés par de telles caractéristiques comme par exemple le cinéma à effets spéciaux ou les jeux vidéos. En disposant de suffisamment de temps et de budget, les studios sont alors capables de produire des humains virtuels photoréalistes, qui suivent fidèlement les mouvements et expressions d'un acteur comme par exemple "Siren"¹, qui s'appuie sur des techniques de capture de mouvement et d'animation faciale appliquée sur des humains virtuels de très haute qualité en temps réel. Il faut noter évidemment que dans ce cadre, l'humain virtuel se comporte selon un scénario prédéfini. D'autres cas applicatifs ont considéré des agents virtuels conversationnels en s'intéressant par exemple, en addition à la question de la génération du langage, aux aspects liés au sourire (OCHS, PELACHAUD et MCKEOWN, 2017), aux gestes accompagnant la conversation vecteurs d'émotions (CASTILLO et NEFF, 2019; FOURATI et PELACHAUD, 2016), à l'empathie (YALÇIN, 2020), ou encore à l'initiation de l'interaction par le contact visuel (BEE, ANDRÉ et TOBER, 2009).

Notre projet a pour but de considérer des tâches non conversationnelles impliquant l'ensemble du corps et en particulier durant la locomotion. Notre approche vise à se concentrer sur les paramètres principaux qui caractérisent la communication non verbale à savoir la question de proxémie (la distance interpersonnelle, l'orientation et le toucher caractérisant la séparation spatiale interpersonnelle selon REMLAND, JONES et BRINKMAN, 1995), la posture et le mouvement de la tête, du corps et des segments,

1. <https://cubicmotion.com/case-studies/siren/>

et le regard (JUSLIN et al., 2005). Ces paramètres devront être modulés de telle sorte à produire des mouvements expressifs, qui sont fondamentaux durant les interactions. Pour exemple, l'expression des émotions et leur reconnaissance par les autres jouent un rôle majeur dans les interactions de la vie quotidienne (ATKINSON et al., 2004 ; FERRI et al., 2013 ; NUMMENMAA et al., 2012 ; SINKE, KRET et GELDER, 2012) mais également dans la perception d'un individu envers un humain virtuel (BATES et al., 1994). Un individu est ainsi capable de percevoir les émotions de l'autre à la fois sur des corps statiques (COULSON, 2004) ou en mouvement, y compris lors de tâche locomotrices (BARLIYA et al., 2013 ; CRANE et GROSS, 2007 ; MONTEPARE, GOLDSTEIN et CLAUSEN, 1987 ; ROETHER et al., 2009). D'un point de vue cinématique, l'état émotionnel du marcheur va affecter sa posture globale (KADONE, BERTHOZ et HICHEUR, 2009 ; ROETHER et al., 2009), ses mouvements corporels en terme d'amplitude et de vitesse (CRANE et GROSS, 2007 ; KADONE, BERTHOZ et HICHEUR, 2009) ou encore leur coordination (BARLIYA et al., 2013). Les auteurs ont alors proposé et utilisé différents systèmes de notation comme le système "Body Action and Posture" (DAEL, MORTILLARO et SCHERER, 2012) ou le système de notation de Laban (LABAN et ULLMANN, 1971 ; MELZER, SHAFIR et TSACHOR, 2019) afin d'analyser l'expressivité des mouvements et de comprendre quelles étaient les caractéristiques principales liées à la reconnaissance des émotions (SOLANAS, VAESSEN et GELDER, 2020) où par exemple la posture (angles segmentaires et symétrie) et la direction du mouvement par rapport à l'observateur seraient des critères importants. D'autres auteurs ont par ailleurs proposé des modèles du langage corporel émotionnel en proposant une approche basée sur un problème de contrôle optimal, pour lequel différentes émotions induisent différentes fonctions objectives (FELIS, MOMBAUR et BERTHOZ, 2014). Si on considère à présent les études qui se sont intéressées à la question des émotions durant la locomotion et les interactions, on peut citer les travaux que nous avons menés dans le cadre de l'interaction entre deux individus marchant côte à côte sous différentes conditions d'états émotionnels (PERRINET, OLIVIER et PETTRÉ, 2013). Nos résultats ont montré que les individus adaptent leur vitesse de marche et leur position relative non seulement selon leur état émotionnel mais également celui de l'autre marcheur. Par exemple, un marcheur exprimant un état émotionnel neutre va marcher

plus vite en présence d'un marcheur en colère ou joyeux. La distance interpersonnelle est augmentée quand un marcheur neutre interagit avec un marcheur en colère, joyeux ou effrayé en comparaison avec un autre marcheur neutre. Aussi, dans la situation où un marcheur en colère ou joyeux interagit avec un marcheur neutre, ce dernier marche devant. De manière intéressante, ces résultats ont été retrouvés en réalité virtuelle. D'autres études se sont également intéressées à l'effet des émotions sur l'espace personnel. Ainsi, il a été montré que des distances interpersonnelles plus grandes sont retrouvées face à une personne en colère par rapport à une personne neutre ou joyeuse, que ce soit lors d'une tâche sur écran d'ordinateur (WAGELS et al., 2017) ou en réalité virtuelle (BÖNSCH et al., 2018). Le nombre de personnes approchant a également un effet, une personne seule pouvant s'approcher plus près qu'un groupe de 3 personnes. (BÖNSCH et al., 2018)

La question de l'expressivité des humains virtuels a également été traitée dans le contexte des groupes et des foules. Les auteurs ont par exemple cherché à attribuer des traits de personnalité aux différents individus composant la foule virtuelle, en utilisant par exemple le modèle OCEAN (GOLDBERG, 1990) pour de nouveaux modèles de simulation de foules (DURUPINAR et al., 2008 ; GUY et al., 2011). Les auteurs se sont ainsi intéressés à la question de la contagion des émotions au sein de la foule (LHOMMET, LOURDEAUX et BARTHÈS, 2011 ; NETO, PELACHAUD et MUSSE, 2017 ; TSAI et al., 2012) qui nécessiterait un niveau de réalisme élevé quant à l'apparence des humains virtuels (VOLANTE et al., 2016). Concernant la notion de groupe, d'autres études se sont intéressées à la catégorisation sociale. Wilder (1986) a ainsi mis en avant que les individus organisaient leur environnement en se catégorisant eux-mêmes et ainsi que les autres dans des groupes. Trois catégories de relations ont alors été décrites (1) il n'y a pas de relation entre l'individu et le groupe, (2) l'individu est membre du groupe (in group), et (3) l'individu ne fait pas partie du groupe et le compare avec son propre groupe (in group/out group). Cette catégorisation implique des notions de similarité, d'homogénéité, de différence et permettrait aux individus de simplifier leur environnement social. Dans le cas d'étude de situations conversationnelles, considérée ici comme une situation in-group, il a été montré que les positions relatives des membres du groupe étaient organisées de telle sorte que chaque membre du groupe partage des espaces similaires (KENDON,

1990), ces espaces étant modifiés de manière dynamique pour inclure d'autres membres du groupe. Cafaro et al. (2016) se sont inspirés de ces concepts de classification sociale au sein de groupes afin de concevoir des agents virtuels réalistes dans des situations de petits groupes de conversation mettant en jeu des comportements non verbaux. Les auteurs dans une expérience en réalité virtuelle où un utilisateur interagit avec un groupe, ont manipulé les positions relatives de chaque individu au sein du groupe ainsi que les attitudes interpersonnelles (amicales ou non). Une attitude "in-group" est alors dirigée vers un membre du groupe et est observable par l'utilisateur ne faisant pas partie de ce groupe. Une attitude "out-group" est à l'inverse une attitude dirigée de manière générale vers l'avatar de l'utilisateur qui s'approche du groupe. Les résultats ont montré que l'attitude 'out-group' a un effet important puisqu'elle augmente le sentiment de présence sociale dans le cas où les humains virtuels avaient une attitude amicale. La distance inter-personnelle laissée par l'utilisateur dépendait également de l'attitude "in-group/out-group".

Cette présentation d'article, bien que non exhaustive, nous montre que la question de l'expressivité et la réactivité des humains virtuels est centrale dans l'amélioration de leur réalisme et ainsi du réalisme des expériences immersives. Ces capacités sont aujourd'hui limitées, en général à quelques scénarios prévus par les concepteurs. Ainsi, lorsque l'utilisateur sort de ce cadre, l'acteur digital n'est plus capable de générer une réponse motrice adéquate, provoquant potentiellement une rupture de sentiment de présence de l'utilisateur dans la scène dans laquelle il est immergé. De nombreuses questions théoriques et techniques demeurent ainsi ouvertes à ce jour, notamment dans le cas d'une interaction entre marcheurs, en mouvement. Dans le cadre de ce deuxième axe, il s'agira alors de s'intéresser à deux grands cas d'études que sont les interactions entre un individu et un humain virtuel (1-1) et les interactions entre un individu et plusieurs humains virtuels (1-N). Dans le cas des interaction 1-1, le défi sera de modéliser un ensemble de mouvements réactifs qui permettraient à un humain virtuel de produire une palette de réactions aux actions de l'utilisateur largement étendue par rapport aux capacités actuelles. Ceci nécessite d'établir une taxonomie des événements déclenchés par l'utilisateur pour lesquels nous souhaitons observer une réaction de l'humain virtuel ainsi

que des expressions que l'acteur digital doit transmettre. La question de l'interprétation des mouvements de l'utilisateur par l'humain virtuel, afin que ce dernier puisse réagir de manière autonome sera centrale. En particulier, la question de la position et du mouvement global et segmentaire de l'utilisateur dans le champ de vision de l'humain virtuel sera explorée. Il s'agira ainsi de mettre en avant des invariants correspondants aux variables perçues dans le champ visuel et qui déclenchent une action de l'humain virtuel. Dans le cas de l'interaction 1-N, il s'agira alors de moduler l'expressivité de plusieurs humains virtuels en s'appuyant sur leur mouvement collectif et leur position relative en regard de l'utilisateur. La modulation de l'expressivité du groupe s'appuiera sur les concepts de catégorisation sociale comme présentés ci-dessus, ainsi que sur les notions de formations qui vont permettre de contrôler les positions et orientations relatives. On pourra également considérer dans la manière dont les humains virtuels se positionnent au sein du groupe la question du contenu présent dans leur champ visuel. Les critères d'évaluation concerneront pour les deux études le sentiment de présence, les résultats d'études en perception sur le réalisme des interactions ainsi produites ainsi que les métriques de l'interaction entre l'utilisateur et l'(es) humains(s) virtuel(s). La création d'humains virtuels réactifs et expressifs est une étape incontournable pour mettre en place de nouveaux paradigmes expérimentaux et motive les efforts à investir dans ce projet dont la complexité réside dans la capture des nuances et relations mutuelles de la communication non-verbale dans les comportements d'interaction entre marcheurs.

3.4 Axe 3 : Approche individuelle des coordinations visuo-motrices

Le dernier axe de mon projet de recherche s'inscrit dans le développement d'une nouvelle thématique, qui vise non plus à mettre en avant des invariants caractérisant les coordinations visuo-motrices à l'échelle d'une population, mais au contraire à individualiser les analyses. L'individualisation des analyses est un enjeu majeur si l'on souhaite considérer des populations spécifiques. En particulier, elle est nécessaire pour poser des diagnostics fins dans le cadre de pathologie, en mettant en avant des similitudes

ou différences avec une population asymptomatique dans les comportements perceptivo-moteurs. Elle peut également permettre de proposer des nouvelles méthodes de suivi des patients suite à une prise en charge. Nous présenterons ainsi deux exemples applicatifs, en considérant des patients douloureux chroniques mais également des athlètes ayant subi une commotion cérébrale.

3.4.1 Patients douloureux chroniques et prise en charge ostéopathique

Ce projet s'intéresse à la question de l'évaluation des coordinations perceptivo-motrices chez des patients douloureux chroniques. Ce projet sera réalisé dans le cadre d'un financement de type contrat doctoral de l'Université Rennes 2 qui a débuté en septembre 2020. La doctorante impliquée dans ce projet est Agathe Bilhaut, ostéopathe de formation et titulaire d'un master de psychologie cognitive. Cette thèse est par ailleurs co-encadrée avec Armel Crétual (Université Rennes 2), et Mathieu Ménard (Institut d'Ostéopathie de Rennes).

La douleur est *"une expérience sensorielle et émotionnelle désagréable, liée à une lésion tissulaire réelle ou potentielle, ou décrite en termes évoquant une telle lésion"* (MERSKEY et BOGDUK, 1994). Cette définition témoigne de la nature subjective de la douleur autant que de sa complexité, ce qui la rend difficile à qualifier et quantifier. La douleur peut être aiguë et jouer un rôle d'alarme, permettant à l'organisme de réagir rapidement en se protégeant du danger (PAYEN et al., 2001). Cependant si cette douleur persiste au-delà de 3 à 6 mois, alors ce mécanisme d'alarme n'est plus justifié et la douleur devient une maladie à part entière, appelée douleur chronique (PROFESSIONNELLES, 2008). Les auteurs ont alors mis en évidence que la douleur chronique demande de fortes ressources attentionnelles, provoquant une baisse des capacités attentionnelles dans d'autres tâches réalisées simultanément (BERRYMAN et al., 2014). La douleur chronique provoque également une diminution des performances physiques telles que des difficultés à la marche (vitesse diminuée), pour porter des objets, et à maintenir une posture confortable (augmentation du balancement du corps) (WEINER et al., 2006).

La prise en charge de la douleur chronique est multidisciplinaire et s'inscrit dans un modèle biopsychosocial intégrant une "représentation de l'être humain dans laquelle les facteurs biologiques, psychologiques et sociaux sont considérés comme participant simultanément au maintien de la santé ou au développement de la maladie" (BERQUIN et al., 2010). La prise en charge de la douleur s'appuie donc sur des interventions médicamenteuses (antidouleurs, antidépresseurs, etc.), chirurgicales ou non-médicamenteuses (psychologiques, activités physiques adaptées, kinésithérapie, ostéopathie, etc.) (PROFESSIONNELLES, 2008). Dans le cadre de ce projet, nous nous intéressons à la prise en charge ostéopathique. L'ostéopathie est une discipline manuelle de soins de santé, holistique centrée sur la personne, de première intention et mettant l'accent sur l'interrelation entre la structure et la fonction du corps (ORGANIZATION, 2019). La prise en charge ostéopathique intègre le modèle biopsychosocial en s'intéressant aux facteurs neurologiques de la douleur (modulation, désensibilisation et intégration sensori-motrice), aux facteurs tissulaires (adaptation des mouvements et flexibilité des différents segments corporels) et psychosociaux (rassurer et éduquer le patient sur la peur et l'anxiété liées à la douleur, redonner confiance dans le mouvement, encourager les activités physiques et l'autonomisation) (ORGANIZATION, 2019). Plusieurs études ont ainsi rapporté que la prise en charge ostéopathique a un impact positif sur les lombalgies chroniques même si les mécanismes physiologiques restent peu clairs et controversés. Ces études évaluent le plus souvent la prise en charge ostéopathique au moyen d'échelles d'auto-évaluation unidimensionnelles qui mesurent l'intensité de la douleur (Échelles Visuelle Analogique (EVA), Numérique (EN), Verbale (EV), etc.), ou d'hétéro-évaluation appréciant quantitativement et qualitativement différents aspects de la douleur (anxiété, dépression, perturbation de la vie quotidienne, limites physiques) et des outils spécifiques caractérisant les mécanismes physiologiques provoquant la douleur (inflammatoires, nociplastiques, neuropathiques). Cependant peu de protocoles de recherche évaluent la douleur dans un contexte écologique, en mettant en jeu des situations en mouvement (MÉNARD et al., 2019), comme par exemple lors de l'étude de la locomotion en interaction avec son environnement, qui pourrait donner lieu à de nouvelles métriques pour évaluer les effets de la douleur.

En lien avec les études ayant mis en avant l'augmentation du coût attentionnel lié à la douleur (BERRYMAN et al., 2014), on peut faire référence à des travaux s'étant intéressés à l'interaction entre l'attention et la locomotion. Lajoie et al. (LAJOIE et al., 1993) ont étudié le coût attentionnel inhérent à la locomotion en évaluant le contrôle de l'équilibre lors de différentes exigences posturales statiques (assis et debout) et dynamiques (marche). Les auteurs ont montré que les demandes attentionnelles s'accroissent avec l'augmentation des contraintes d'équilibre. En utilisant le paradigme de double tâche, des auteurs se sont également intéressés aux effets d'une tâche interférentielle sur la locomotion. Les résultats ont montré que la division d'attention diminue significativement l'habileté à éviter des obstacles apparaissant soudainement (WEERDESTYEN et al., 2003) dans une tâche de marche sur tapis roulant avec des obstacles à éviter en passant par dessus. Les variations de stratégies d'adaptation du contrôle locomoteur ont été étudiées dans différentes populations, comme chez les sujets âgés qui présentent une dégénérescence normale des fonctions sensorielles, demandant une attention accrue sur leur contrôle postural, caractérisée par des oscillations plus importantes du corps (SHUMWAY-COOK et WOOLLACOTT, 2000). Enfin, on peut citer les travaux de Gérin-Lajoie et al. (2006) qui ont montré que suite à l'ajout d'une double tâche lors d'un contournement d'obstacle fixe, on observait une augmentation plus importante de l'espace personnel et une diminution plus marquée de la vitesse de marche chez les personnes âgées en comparaison avec les personnes plus jeunes. Nous pouvons alors émettre l'hypothèse que, comme les sujets âgés, les patients douloureux chroniques ne présentent pas les mêmes stratégies d'adaptation que les sujets sains lors de la locomotion.

Le premier objectif de ce projet est ainsi de mieux comprendre l'impact de la douleur chronique sur les stratégies perceptivo-motrices durant des tâches de locomotion en interaction avec l'environnement. Ce projet vise dans un second temps à évaluer la sensibilité de tels protocoles pour diagnostiquer et suivre individuellement les patients dans un domaine applicatif comme la prise en charge ostéopathique. Ainsi, nous souhaitons quantifier la capacité d'un tel programme de rééducation fonctionnelle à améliorer la santé des patients. Afin de répondre à ces deux objectifs, nous utiliserons un paradigme

de marche en interaction avec l'environnement en considérant deux tâches. La première tâche est une tâche de passage par une ouverture, largement décrite dans la littérature chez d'autres populations et mettant en jeu la notion d'affordances. Le principe fondamental est de demander à des participants de marcher au travers une ouverture de largeur variable. Il s'agit alors d'identifier la largeur pour laquelle on observe le changement de décision consistant à passer face à la porte à tourner la ligne des épaules. Cette largeur, rapportée à la largeur des épaules et appelée seuil critique a montré son intérêt pour comprendre la manière dont les individus interagissent avec l'environnement en fonction de leurs capacités d'action (HACKNEY et CINELLI, 2013b ; HACKNEY, CINELLI et FRANK, 2014 ; HIGUCHI et al., 2006, 2009 ; WARREN JR et WHANG, 1987). Nous comparerons ainsi les seuils critiques de patients douloureux chroniques avec des participants asymptomatiques appariés en âge. Nous envisageons de travailler avec des patients souffrant de mal de dos chronique. La seconde tâche consistera à reproduire notre paradigme de croisement à 90° entre deux marcheurs et de travailler sur les métriques d'interaction que nous avons développées, en particulier en s'intéressant au seuil de distance future déclenchant une collision, la distance de croisement, le nombre d'inversion de l'ordre de passage, l'évolution de *mpd* et d'autres variables comme le temps restant avant l'interaction au moment de l'adaptation du mouvement. Ces analyses dans un premier temps au niveau d'un échantillon global devront être repensées pour tenir compte d'une évaluation individuelle. Enfin, sur la base des résultats de ces deux études, nous procéderons dans une troisième étude à la réplique de ces paradigmes avant et après manipulation ostéopathique pour mesurer l'effet individuel de cette prise en charge sur des tâches de locomotion dans un environnement complexe.

3.4.2 Symptômes persistants de la commotion cérébrale

Le deuxième exemple applicatif de cette thématique de l'approche individuelle des coordination visuo-motrices concerne le cas des athlètes ayant subi une commotion cérébrale. Il vient s'inscrire en continuité avec les travaux présentés en section 2.5.2 où nous avons pu montrer des effets persistants de la commotion cérébrale sur les coordinations visuo-motrices chez des jeunes joueurs et joueuses de rugby ayant subi une

commotion dans les 6 derniers mois et étant retournés sur le terrain. En particulier, nous avons pu mettre en avant des différences sur les seuils de distance future de croisement déclenchant une adaptation de mouvement ainsi sur les contributions de chaque marcheur à l'évitement de collision.

Le protocole que nous avons proposé est en pratique complexe à mettre en place car il requiert la présence de plusieurs joueurs/joueuses commotionnés au laboratoire et le suivi régulier de ces athlètes semble alors compromis. Il est néanmoins nécessaire de réaliser des passations régulières afin d'étudier l'évolution temporelle des effets de la commotion sur les coordinations visuo-motrices. Une analyse fine des mouvements d'un athlète seul et non pas de la combinaison des mouvements de deux athlètes (comme réalisé dans l'étude du croisement entre deux individus en situations réelle) est également importante pour se focaliser sur les caractéristiques individuelles. Réussir à détecter chez un athlète la persistance ou l'absence de symptômes résiduels de la commotion permettrait de compléter le diagnostic clinique du médecin afin d'orienter les décisions de retour au jeu. Pour cela, nous proposons de développer des protocoles expérimentaux compatibles avec les contraintes des athlètes. En lien très fort avec l'axe 2 de mon projet de recherche, nous souhaitons déployer nos efforts pour explorer le potentiel de la réalité virtuelle pour mener de telles analyses.

L'intérêt de la réalité virtuelle pour explorer les questions liées aux commotions cérébrales peut être illustré par des travaux récents qui ont considéré par exemple les effets résiduels de la commotion cérébrale sur les capacités fonctionnelles d'équilibre en manipulant les caractéristiques du flux optique (SLOBOUNOV, SLOBOUNOV et NEWELL, 2006 ; WRIGHT et al., 2017), ou encore l'utilisation de ces technologies pour mettre en place des programmes d'entraînement de l'équilibre (CUTHBERT et al., 2014 ; STRAUDI et al., 2017 ; USTINOVA et al., 2014). Certains auteurs ont démontré la capacité de la réalité virtuelle à détecter des différences concernant les fonctions exécutives entre des militaires ayant subi une commotion cérébrale et des adultes sains en s'appuyant sur un paradigme de navigation dans un environnement virtuel encombré dans un contexte

militaire (ROBITAILLE et al., 2017). Un point intéressant de cette étude réside dans l'importance de la présence de l'avatar pour détecter les symptômes persistants de la commotion. D'autres auteurs ont également développé des protocoles d'évaluation (NOLIN et al., 2012) et de prise en charge (STRAUDI et al., 2017) des déficits de l'attention. Les auteurs ont également considéré la question des mécanismes cognitifs et neuraux en lien avec les déficits de résolution de problèmes sociaux en développant des scénarios de conflits sociaux en réalité virtuelle (HANTEN et al., 2011). La récente revue de littérature de Santos et al. (2020) met ainsi en avant le fait que la réalité virtuelle est un outil prometteur pour l'étude du contrôle postural et des mécanismes neuropsychologiques en lien avec la commotion cérébrale, permettant des interventions personnalisées qui seraient plus sensibles que des protocoles cliniques classiques.

Alors que les premiers travaux utilisant la réalité virtuelle pour l'étude et la prise en charge d'individus ayant subi une commotion cérébrale ont montré son potentiel, il nous semble important de valider son usage pour l'étude des coordinations visuo-motrices chez ces athlètes. Ainsi, en collaboration avec les clubs de rugby locaux et les médecins, il s'agira dans un premier temps de reproduire notre paradigme de croisement entre deux piétons en conditions réelles sur la plateforme de réalité virtuelle avec des athlètes ayant subi une commotion cérébrale dans les six derniers mois en comparaison avec des athlètes n'ayant jamais subi de commotion. Afin de prendre en considération les contraintes de passation de l'expérimentation dans le cadre d'une évaluation et d'un suivi des athlètes sur leur lieu d'entraînement, il nous semble fondamental d'envisager un dispositif léger tel un casque de réalité virtuelle, et de considérer des interfaces de locomotion ne nécessitant pas de déplacement physique de l'individu afin d'éviter les problématiques liées à l'enregistrement du mouvement du participant. Il faudra tenir compte des spécificités de la population ayant subi une commotion dans la conception de l'expérience afin d'en évaluer sa faisabilité dans le cadre de troubles visuo-vestibulaires et du contrôle postural. Si nous réussissons à montrer la capacité de cette tâche en réalité virtuelle à mettre en évidence des différences entre un athlète commotionné et non commotionné, il s'agira dans un second temps de proposer une étude longitudinale de

grande échelle afin d'analyser l'évolution des symptômes visuo-moteurs persistants de la commotion, en lien avec les symptômes cliniques. L'objectif essentiel est de proposer un outil d'aide au diagnostic individuel de la commotion cérébrale et d'aide à la décision pour le retour au jeu des athlètes.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les grandes directions de mon projet de recherche sur la question des interactions non verbales entre personnes. Ce projet s'organise selon trois grands axes intégrant les aspects liés au contrôle de l'interaction, à la validation et l'amélioration de la plateforme de réalité virtuelle ainsi qu'aux applications cliniques dans le cadre de l'individualisation des analyses. A l'image de mes travaux précédents, l'approche que je souhaite mener s'inscrit dans un cadre transdisciplinaire, tirant profit des collaborations entre les chercheurs des Sciences du mouvement, des Sciences du numérique et des domaines applicatifs qui permettent de faire émerger de nouvelles questions de recherche. Dans ce cadre, je souhaite poursuivre en parallèle mon implication dans l'animation de la communauté scientifique, que ce soit à travers le groupe de discussion PIE (Person Interaction in an Environment) offrant des échanges réguliers sur les travaux en cours entre les équipes rennaises et canadiennes, ainsi que la co-organisation des Workshops "Walker Behaviour : from analysis to applications" et VHCIE (Virtual Humans and Crowds in Immersive Environments), qui permettent une émulation scientifique, confrontant les points de vue et approche des différents domaines intéressés par la questions des interactions entre marcheurs.

Bibliographie

- ACKERMANN, C. et al. (2019). « Deceleration parameters and their applicability as informal communication signal between pedestrians and automated vehicles ». In : *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour* 62, p. 757-768.
- AGATHOS, C. P. et al. (2017). « Drifting while stepping in place in old adults : Association of self-motion perception with reference frame reliance and ground optic flow sensitivity ». In : *Neuroscience* 347, p. 134-147.
- AL-YAHYA, E. et al. (2011). « Cognitive motor interference while walking : a systematic review and meta-analysis ». In : *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 35.3, p. 715-728.
- ALI, S. et al. (2019). « Smart Wheelchair Maneuvering Among People ». In : *International Conference on Intelligent Computing*. Springer, p. 32-42.
- AMBROSE, A. F., G. PAUL et J. M. HAUSDORFF (2013). « Risk factors for falls among older adults : a review of the literature ». In : *Maturitas* 75.1, p. 51-61.
- ANDERSEN, G. J. et R. D. KIM (2001). « Perceptual information and attentional constraints in visual search of collision events. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 27.5, p. 1039.
- ARECHA VALETA, G. et al. (2006a). « Optimizing principles underlying the shape of trajectories in goal oriented locomotion for humans ». In : *6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, p. 131-136.
- (2006b). « The nonholonomic nature of human locomotion : a modeling study ». In : *IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, p. 158-163.
- ARGELAGUET SANZ, F. et al. (2015). « Virtual proxemics : Locomotion in the presence of obstacles in large immersive projection environments ». In : *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*. IEEE, p. 75-80.
- ARNALDI, B., P. FUCHS et J. TISSEAU (2003). « Traité de la réalité virtuelle, volume 1, chapitre Introduction à la réalité virtuelle ». In : *Presses de l'École des Mines de Paris*, p. 3-21.
- ASSAIANTE, C. (1998). « Development of locomotor balance control in healthy children ». In : *Neuroscience & biobehavioral reviews* 22.4, p. 527-532.
- ASSAIANTE, C. et B. AMBLARD (1993). « Ontogenesis of head stabilization in space during locomotion in children : influence of visual cues ». In : *Experimental Brain Research* 93.3, p. 499-515.
- ATKINSON, A. P. et al. (2004). « Emotion perception from dynamic and static body expressions in point-light and full-light displays ». In : *Perception* 33.6, p. 717-746.
- BAILENSON, J. N. et al. (2001). « Equilibrium theory revisited : Mutual gaze and personal space in virtual environments ». In : *Presence : Teleoperators & Virtual Environments* 10.6, p. 583-598.
- (2003). « Interpersonal distance in immersive virtual environments ». In : *Personality and social psychology bulletin* 29.7, p. 819-833.
- BAKER, C. S. et M. E. CINELLI (2014). « Visuomotor deficits during locomotion in previously concussed athletes 30 or more days following return to play ». In : *Physiological reports* 2.12, e12252.

- BANTON, T. et al. (2005). « The perception of walking speed in a virtual environment ». In : *Presence : Teleoperators & Virtual Environments* 14.4, p. 394-406.
- BARLIYA, A. et al. (2013). « Expression of emotion in the kinematics of locomotion ». In : *Experimental brain research* 225.2, p. 159-176.
- BASIL, P. et al. (2013). « Strategies of locomotor collision avoidance ». In : *Gait & posture* 37.3, p. 385-390.
- BASTIN, J., C. CRAIG et G. MONTAGNE (2006). « Prospective strategies underlie the control of interceptive actions ». In : *Human movement science* 25.6, p. 718-732.
- BASTIN, J. et al. (2008). « Testing the role of expansion in the prospective control of locomotion ». In : *Experimental Brain Research* 191.3, p. 301-312.
- BATES, J. et al. (1994). « The role of emotion in believable agents ». In : *Communications of the ACM* 37.7, p. 122-125.
- BEE, N., E. ANDRÉ et S. TOBER (2009). « Breaking the ice in human-agent communication : Eye-gaze based initiation of contact with an embodied conversational agent ». In : *International Workshop on Intelligent Virtual Agents*. Springer, p. 229-242.
- BENGLER, K. et al. (2014). « Three decades of driver assistance systems : Review and future perspectives ». In : *IEEE Intelligent transportation systems magazine* 6.4, p. 6-22.
- BENGUIGUI, N., H. RIPOLL et M. BRODERICK (2003). « Time-to-contact estimation of accelerated stimuli is based on first-order information ». In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 29.6, p. 1083-1101.
- BENNETT, S. J. et N. BENGUIGUI (2013). « Is acceleration used for ocular pursuit and spatial estimation during prediction motion ? » In : *PLoS One* 8.5, e63382.
- (2016). « Spatial Estimation of Accelerated Stimuli Is Based on a Linear Extrapolation of First-Order Information ». In : *Experimental psychology*.
- BERARD, J. R. et L. A. VALLIS (2006). « Characteristics of single and double obstacle avoidance strategies : a comparison between adults and children ». In : *Experimental brain research* 175.1, p. 21-31.
- BERARD, J. R. et al. (2009). « Aging affects the ability to use optic flow in the control of heading during locomotion ». In : *Experimental brain research* 194.2, p. 183-190.
- BERG, W. P. et al. (1997). « Circumstances and consequences of falls in independent community-dwelling older adults ». In : *Age and ageing* 26.4, p. 261-268.
- BERGER, W., E. ALTENMUELLER et V. DIETZ (1984). « Normal and impaired development of children's gait. » In : *Human Neurobiology* 3.3, p. 163-170.
- BERQUIN, A. et al. (2010). « Le modèle biopsychosocial : beaucoup plus qu'un supplément d'empathie ». In : *Médecine du sport* 258.28, p. 1511-1513.
- BERRYMAN, C. et al. (2014). « Do people with chronic pain have impaired executive function ? A meta-analytical review ». In : *Clinical psychology review* 34.7, p. 563-579.
- BERTON, F. et al. (2019). « Studying gaze behaviour during collision avoidance with a virtual walker : Influence of the virtual reality setup ». In : *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, p. 717-725.
- BERTON, F. et al. (2020). « Eye-Gaze Activity in Crowds : Impact of Virtual Reality and Density ». In : *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, p. 322-331.
- BILLINO, J. et K. S. PILZ (2019). « Motion perception as a model for perceptual aging ». In : *Journal of vision* 19.4, p. 3-3.
- BLASCOVICH, J. et al. (2002). « Immersive virtual environment technology as a methodological tool for social psychology ». In : *Psychological inquiry* 13.2, p. 103-124.

- BÖNSCH, A. et al. (2018). « Social VR : How personal space is affected by virtual agents' emotions ». In : *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, p. 199-206.
- BORGHESE, N., L. BIANCHI et F. LACQUANITI (1996). « Kinematic determinants of human locomotion ». In : *The Journal of Physiology* 494.3, p. 863-879.
- BOSCO, G., S. DELLE MONACHE et F. LACQUANITI (2012). « Catching what we can't see : manual interception of occluded fly-ball trajectories ». In : *PLoS One* 7.11, e49381.
- BOSCO, G. et al. (2015). « Filling gaps in visual motion for target capture ». In : *Frontiers in Integrative Neuroscience* 9, p. 13. ISSN : 1662-5145. DOI : 10.3389/fnint.2015.00013.
- BOTELLO, B. et al. (2019). « Planning for walking and cycling in an autonomous-vehicle future ». In : *Transportation research interdisciplinary perspectives* 1, p. 100012.
- BRADY, A. T. et M. B. WALKER (1978). « Interpersonal distance as a function of situationally induced anxiety ». In : *British Journal of Social and Clinical Psychology* 17.2, p. 127-133.
- BROSSEAU-LACHAINE, O. et al. (2008). « Mild traumatic brain injury induces prolonged visual processing deficits in children ». In : *Brain Injury* 22.9, p. 657-668.
- BRUMENT, H. et al. (2019). « Virtual vs. physical navigation in vr : Study of gaze and body segments temporal reorientation behaviour ». In : *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, p. 680-689.
- BRUNEAU, J., A.-H. OLIVIER et J. PETTRE (2015). « Going through, going around : A study on individual avoidance of groups ». In : *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 21.4, p. 520-528.
- BUCK, L. E., M. K. YOUNG et B. BODENHEIMER (2018). « A comparison of distance estimation in HMD-based virtual environments with different HMD-based conditions ». In : *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)* 15.3, p. 1-15.
- BÜHLER, M. A. et A. LAMONTAGNE (2018). « Circumvention of pedestrians while walking in virtual and physical environments ». In : *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering* 26.9, p. 1813-1822.
- BULL, F. C., T. S. MASLIN et T. ARMSTRONG (2009). « Global physical activity questionnaire (GPAQ) : nine country reliability and validity study ». In : *Journal of Physical Activity and health* 6.6, p. 790-804.
- CAFARO, A. et al. (2016). « The effects of interpersonal attitude of a group of agents on user's presence and proxemics behavior ». In : *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiIS)* 6.2, p. 1-33.
- CAMPORRESI, C. et M. KALLMANN (2015). « The effects of avatars, stereo vision and display size on reaching and motion reproduction ». In : *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 22.5, p. 1592-1604.
- CARTON, D., W. OLSZOWY et D. WOLLHERR (2016). « Measuring the effectiveness of readability for mobile robot locomotion ». In : *International Journal of Social Robotics* 8.5, p. 721-741.
- CARTON, D. et al. (2013). « Proactively approaching pedestrians with an autonomous mobile robot in urban environments ». In : *Experimental Robotics*. Springer, p. 199-214.
- CASTILLO, G. et M. NEFF (2019). « What do we express without knowing ? Emotion in Gesture ». In : *Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, p. 702-710.
- CATENA, R. D. et al. (2009). « Spatial orientation of attention and obstacle avoidance following concussion ». In : *Experimental brain research* 194.1, p. 67-77.
- CAVAGNA, G., H. THYS et A. ZAMBONI (1976). « The sources of external work in level walking and running ». In : *The Journal of Physiology* 262.3, p. 639-657.

- CHAPMAN, G. et M. A. HOLLANDS (2006). « Evidence for a link between changes to gaze behaviour and risk of falling in older adults during adaptive locomotion ». In : *Gait & posture* 24.3, p. 288-294.
- CHARETTE, C., F. ROUTHIER et B. J. MCFADYEN (2015). « Visuo-locomotor coordination for direction changes in a manual wheelchair as compared to biped locomotion in healthy subjects ». In : *Neuroscience letters* 588, p. 83-87.
- (2017). « Visuo-locomotor control in persons with spinal cord injury in a manual or power wheelchair for direction change and obstacle circumvention ». In : *Experimental Brain Research* 235.9, p. 2669-2678.
- CHEW, L. P. (1989). « Constrained delaunay triangulations ». In : *Algorithmica* 4.1-4, p. 97-108.
- CINELLI, M. et A. PATLA (2007). « Travel path conditions dictate the manner in which individuals avoid collisions ». In : *Gait & Posture* 26.2, p. 186-193.
- (2008). « Task-specific modulations of locomotor action parameters based on on-line visual information during collision avoidance with moving objects ». In : *Human Movement Science* 27.3, p. 513-531.
- CINELLI, M. E., A. E. PATLA et F. ALLARD (2009). « Behaviour and gaze analyses during a goal-directed locomotor task ». In : *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 62.3, p. 483-499.
- CIRIO, G. et al. (2013). « Kinematic evaluation of virtual walking trajectories ». In : *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 19.4, p. 671-680.
- COREN, S. et C. PORAC (1982). « Monocular asymmetries in visual latency as a function of sighting dominance ». In : *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 59, p. 987-990.
- COULSON, M. (2004). « Attributing emotion to static body postures : Recognition accuracy, confusions, and viewpoint dependence ». In : *Journal of nonverbal behavior* 28.2, p. 117-139.
- COURTINE, G. et M. SCHIEPPATI (2003). « Human walking along a curved path. I. Body trajectory, segment orientation and the effect of vision ». In : *European Journal of Neuroscience* 18.1, p. 177-190.
- COUZIN, I. D., J. KRAUSE et al. (2003). « Self-organization and collective behavior in vertebrates ». In : *Advances in the Study of Behavior* 32.1, p. 10-1016.
- CRANE, E. et M. GROSS (2007). « Motion capture and emotion : Affect detection in whole body movement ». In : *International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction*. Springer, p. 95-101.
- CRENNA, P. et al. (2007). « The association between impaired turning and normal straight walking in Parkinson's disease ». In : *Gait & Posture* 26.2, p. 172-178.
- CROFT, J. L. et D. PANCHUK (2017). « Watch Where You're Going ? Interferer Velocity and Visual Behavior Predicts Avoidance Strategy During Pedestrian Encounters ». In : *Journal of Motor Behavior* 0.0, p. 1-11.
- CUERVO, E., K. CHINTALAPUDI et M. KOTARU (2018). « Creating the perfect illusion : What will it take to create life-like virtual reality headsets ? » In : *Proceedings of the 19th International Workshop on Mobile Computing Systems & Applications*, p. 7-12.
- CUMMINGS, J. J. et J. N. BAIENSON (2016). « How immersive is enough ? A meta-analysis of the effect of immersive technology on user presence ». In : *Media Psychology* 19.2, p. 272-309.
- CURRANO, R. et al. (2018). « ¡ Vamos ! Observations of Pedestrian Interactions with Driverless Cars in Mexico ». In : *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, p. 210-220.
- CUTHBERT, J. P. et al. (2014). « Virtual reality-based therapy for the treatment of balance deficits in patients receiving inpatient rehabilitation for traumatic brain injury ». In : *Brain injury* 28.2, p. 181-188.

- CUTTING, J., P. VISHTON et P. BRAREN (1995). « How we avoid collisions with stationary and moving obstacles ». In : *Psychological review* 102.4, p. 627-651.
- DAEL, N., M. MORTILLARO et K. R. SCHERER (2012). « The body action and posture coding system (BAP) : Development and reliability ». In : *Journal of Nonverbal Behavior* 36.2, p. 97-121.
- DELLE MONACHE, S., F. LACQUANITI et G. BOSCO (2015). « Eye movements and manual interception of ballistic trajectories : effects of law of motion perturbations and occlusions ». In : *Experimental brain research* 233.2, p. 359-374.
- DE'SPERATI, C. et P. VIVIANI (1997). « The Relationship between Curvature and Velocity in Two-Dimensional Smooth Pursuit Eye Movements ». In : *Journal of Neuroscience* 17.10, p. 3932-3945.
- DEY, D. et al. (2019). « Pedestrian road-crossing willingness as a function of vehicle automation, external appearance, and driving behaviour ». In : *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour* 65, p. 191-205.
- DITE, W. et V. TEMPLE (2002). « Development of a clinical measure of turning for older adults. » In : *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 81.11, p. 857-866.
- DOMÍNGUEZ-ZAMORA, F. J. et al. (2020). « Age-related changes in gaze sampling strategies during obstacle navigation ». In : *Gait & Posture* 76, p. 252-258.
- DOMMÈS, A. (2019). « Street-crossing workload in young and older pedestrians ». In : *Accident Analysis & Prevention* 128, p. 175-184.
- DOMMES, A., V. CAVALLO et J. OXLEY (2013). « Functional declines as predictors of risky street-crossing decisions in older pedestrians ». In : *Accident Analysis & Prevention* 59, p. 135-143.
- DOMMES, A. et al. (2014). « Crossing a two-way street : comparison of young and old pedestrians ». In : *Journal of safety research* 50, p. 27-34.
- DRAGAN, A. D. et al. (2015). « Effects of robot motion on human-robot collaboration ». In : *2015 10th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*. IEEE, p. 51-58.
- DUCOURANT, T. et al. (2005). « Timing and distance characteristics of interpersonal coordination during locomotion ». In : *Neuroscience Letters* 389.1, p. 6-11.
- DURUPINAR, F et al. (2008). « Creating crowd variation with the ocean personality model ». In : *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS 08)*, p. 1217-1220.
- DUTRA, T. B. et al. (2017). « Gradient-based steering for vision-based crowd simulation algorithms ». In : *Computer Graphics Forum*. T. 36. 2. Wiley Online Library, p. 337-348.
- EAGLE, S. R. et al. (2019). « Does concussion affect perception-action coupling behavior? Action boundary perception as a biomarker for concussion ». In : *Clin J Sport Med*.
- EAGLE, S. R. et al. (2020). « Utility of a novel perceptual-motor control test for identification of sport-related concussion beyond current clinical assessments ». In : *Journal of Sports Sciences*, p. 1-7.
- EARHART, G. M. et al. (2001). « Forward versus backward walking : transfer of podokinetic adaptation ». In : *Journal of Neurophysiology* 86.4, p. 1666-1670.
- ENGLAND, S. et K. GRANATA (2007). « The influence of gait speed on local dynamic stability of walking ». In : *Gait & Posture* 25.2, p. 172-178.
- FAIT, P. et al. (2013). « Altered integrated locomotor and cognitive function in elite athletes 30 days postconcussion : a preliminary study ». In : *The Journal of head trauma rehabilitation* 28.4, p. 293-301.

- FAJEN, B. (2005). « Calibration, information, and control strategies for braking to avoid a collision ». In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 31.3, p. 480-501.
- FAJEN, B. R., M. A. RILEY et M. T. TURVEY (2008). « Information, affordances, and the control of action in sport ». In : *international Journal of sport psychology* 40.1, p. 79-107.
- FAURE, C. (2019). « Vers des environnements virtuels plus écologiques : étude des modifications du comportement moteur en réalité virtuelle lors de l'ajout d'informations haptiques par un mécanisme parallèle entraîné par câbles ». In.
- FELIS, M. L., K. MOMBAUR et A. BERTHOZ (2014). « Mathematical modeling of emotional body language during human walking ». In : *Modeling, Simulation and Optimization of Complex Processes-HPSC 2012*. Springer, p. 25-35.
- FERRI, F. et al. (2013). « Binding action and emotion in social understanding ». In : *PloS one* 8.1, e54091.
- FINK, P. W., P. S. FOO et W. H. WARREN (2007). « Obstacle avoidance during walking in real and virtual environments ». In : *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)* 4.1, 2-es.
- FISSET, F., A. LAMONTAGNE et B. J. MCFADYEN (2020). « Limb movements of another pedestrian affect crossing distance but not path planning during virtual over ground circumvention ». In : *Neuroscience letters*, p. 135278.
- FOULSHAM, T., E. WALKER et A. KINGSTONE (2011). « The where, what and when of gaze allocation in the lab and the natural environment ». In : *Vision research* 51.17, p. 1920-1931.
- FOURATI, N. et C. PELACHAUD (2016). « Perception of emotions and body movement in the emilya database ». In : *IEEE Transactions on Affective Computing* 9.1, p. 90-101.
- FRUIN, J. J. (1971). *Designing for pedestrians : A level-of-service concept*. HS-011 999.
- GAGE, J. (1990). « An overview of normal walking ». In : *American Academy of Orthopaedic Surgeons, Instructional Course Lectures* 39, p. 291-303.
- GARAU, M. et al. (2005). « The responses of people to virtual humans in an immersive virtual environment ». In : *Presence : Teleoperators & Virtual Environments* 14.1, p. 104-116.
- GELDER, B. de, J. KÄTSYRI et A. W. de BORST (2018). « Virtual reality and the new psychophysics ». In : *British Journal of Psychology* 109.3, p. 421-426.
- GÉRIN-LAJOIE, M., C. RICHARDS et B. MCFADYEN (2005). « The negotiation of stationary and moving obstructions during walking : anticipatory locomotor adaptations and preservation of personal space ». In : *Motor Control* 9, p. 242-269.
- GÉRIN-LAJOIE, M. et al. (2008). « Characteristics of personal space during obstacle circumvention in physical and virtual environments ». In : *Gait & Posture* 27.2, p. 239-247.
- GERUSCHAT, D. R. et K. A. TURANO (2002). « Connecting research on retinitis pigmentosa to the practice of orientation and mobility ». In : *Journal of Visual Impairment & Blindness* 96.2, p. 69-85.
- GIBSON, J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston : Houghton Mifflin.
- (1986). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Lawrence Erlbaum Associates Inc, US.
- GLASAUER, S. et al. (2002). « Differential effects of labyrinthine dysfunction on distance and direction during blindfolded walking of a triangular path ». In : *Experimental Brain Research* 145.4, p. 489-497.
- GOFFMAN, E. (1971). *Relations in public : microstudies of the public order*. Basic books.
- GOLDBERG, L. R. (1990). « An alternative" description of personality" : the big-five factor structure. » In : *Journal of personality and social psychology* 59.6, p. 1216.
- GOODRICH, M. A. et A. C. SCHULTZ (2008). *Human-robot interaction : a survey*. Now Publishers Inc.

- GORDON, C. et al. (1995). « Adaptive plasticity in the control of locomotor trajectory ». In : *Experimental Brain Research* 102.3, p. 540-545.
- GRASSO, R. et al. (1996). « The predictive brain : anticipatory control of head direction for the steering of locomotion ». In : *Neuroreport* 7.6, p. 1170-1174.
- GRASSO, R. et al. (1998a). « Development of anticipatory orienting strategies during locomotor tasks in children ». In : *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 22.4, p. 533-539.
- GRASSO, R. et al. (1998b). « Eye-head coordination for the steering of locomotion in humans : an anticipatory synergy ». In : *Neuroscience Letters* 253.2, p. 115-118.
- GÉRIN-LAJOIE, M., C. RICHARDS et B. MCFADYEN (2006). « The circumvention of obstacles during walking in different environmental contexts : A comparison between older and younger adults ». In : *Gait & Posture* 24, p. 364-369.
- GRUNDBERG, R. et al. (2019). « Collision avoidance strategies in older adults ». In : *Neurophysiologie Clinique* 49.6, p. 457-458.
- GUY, S. J. et al. (2011). « Simulating heterogeneous crowd behaviors using personality trait theory ». In : *Proceedings of the 2011 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on computer animation*, p. 43-52.
- HABIBOVIC, A. et al. (2016). « Evaluating interactions with non-existing automated vehicles : three Wizard of Oz approaches ». In : *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, p. 32-37.
- HACKNEY, A. L. et M. E. CINELLI (2011). « Action strategies of older adults walking through apertures ». In : *Gait & posture* 33.4, p. 733-736.
- (2013a). « Action strategies used by children to avoid two vertical obstacles in non-confined space ». In : *Experimental brain research* 229.1, p. 13-22.
- (2013b). « Young and older adults use body-scaled information during a non-confined aperture crossing task ». In : *Experimental brain research* 225.3, p. 419-429.
- HACKNEY, A. L., M. E. CINELLI et J. S. FRANK (2014). « Is the critical point for aperture crossing adapted to the person-plus-object system ? » In : *Journal of motor behavior* 46.5, p. 319-327.
- HALL, E. T. (1963). « A system for the notation of proxemic behavior ». In : *American anthropologist* 65.5, p. 1003-1026.
- HALL, E. T. (1966). *The hidden dimension*. T. 609. Garden City, NY : Doubleday.
- HANTEN, G. et al. (2011). « Effects of traumatic brain injury on a virtual reality social problem solving task and relations to cortical thickness in adolescence ». In : *Neuropsychologia* 49.3, p. 486-497.
- HARMON, K. G. et al. (2013). « American Medical Society for Sports Medicine position statement : concussion in sport ». In : *Clinical Journal of Sport Medicine* 23.1, p. 1-18.
- HASE, K. et R. STEIN (1999). « Turning Strategies During Human Walking ». In : *Journal of Neurophysiology* 81.6, p. 2914-2922.
- HASSAN, S. E. et al. (2007). « What is the minimum field of view required for efficient navigation ? » In : *Vision research* 47.16, p. 2115-2123.
- HAUSDORFF, J. M. et al. (2008). « Dual-task decrements in gait : contributing factors among healthy older adults ». In : *The Journals of Gerontology Series A : Biological Sciences and Medical Sciences* 63.12, p. 1335-1343.
- HEITGER, M. H. et al. (2004). « Eye movement and visuomotor arm movement deficits following mild closed head injury ». In : *Brain* 127.3, p. 575-590.
- HEITGER, M. H. et al. (2006). « Motor deficits and recovery during the first year following mild closed head injury ». In : *Brain injury* 20.8, p. 807-824.

- HELBING, D. et P. MUKERJI (2012). « Crowd disasters as systemic failures : analysis of the Love Parade disaster ». In : *EPJ Data Science* 1.1, p. 7.
- HENDRICKS, S., D. KARPUL et M. LAMBERT (2014). « Momentum and kinetic energy before the tackle in rugby union ». In : *Journal of sports science & medicine* 13.3, p. 557.
- HESSELS, R. S. et al. (2020). « Task-related gaze control in human crowd navigation ». In : *Attention, Perception, & Psychophysics*, p. 1-20.
- HICHEUR, H., S. VIEILLEDENT et A. BERTHOZ (2005). « Head motion in humans alternating between straight and curved walking path : Combination of stabilizing and anticipatory orienting mechanisms ». In : *Neuroscience Letters* 383.1-2, p. 87-92.
- HICHEUR, H. et al. (2005). « Velocity and curvature in human locomotion along complex curved paths : a comparison with hand movements ». In : *Experimental Brain Research* 162, p. 145-154.
- HICHEUR, H. et al. (2007). « The formation of trajectories during goal-oriented locomotion in humans. I. A stereotyped behaviour ». In : *European Journal of Neuroscience* 26.8, p. 2376-2390.
- HIGUCHI, T. et al. (2006). « Locomotion through apertures when wider space for locomotion is necessary : adaptation to artificially altered bodily states ». In : *Experimental Brain Research* 175.1, p. 50-59.
- HIGUCHI, T. et al. (2009). « Perception of spatial requirements for wheelchair locomotion in experienced users with tetraplegia ». In : *Journal of physiological anthropology* 28.1, p. 15-21.
- HOLLANDS, M., A. PATLA et J. VICKERS (2002). « Look where you're going ! : gaze behaviour associated with maintaining and changing the direction of locomotion ». In : *Experimental Brain Research* 143.2, p. 221-230.
- HOLLANDS, M., K. SORENSEN et A. PATLA (2001). « Effects of head immobilization on the coordination and control of head and body reorientation and translation during steering ». In : *Experimental Brain Research* 140.2, p. 223-233.
- HOLLMAN, J. H. et al. (2007). « Does walking in a virtual environment induce unstable gait ? : An examination of vertical ground reaction forces ». In : *Gait & Posture* 26.2, p. 289-294.
- HORAK, F. B. (2006). « Postural orientation and equilibrium : what do we need to know about neural control of balance to prevent falls ? » In : *Age and ageing* 35.suppl_2, p. ii7-ii11.
- HORN, B. (1986). *Robot Vision*. MIT Press.
- HOYET, L., R. McDONNELL et C. O'SULLIVAN (2012). « Push it real : Perceiving causality in virtual interactions ». In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 31.4, p. 1-9.
- HUBER, M. et al. (2014). « Adjustments of speed and path when avoiding collisions with another pedestrian ». In : *PloS one* 9.2, e89589.
- HULSE, L. M., H. XIE et E. R. GALEA (2018). « Perceptions of autonomous vehicles : Relationships with road users, risk, gender and age ». In : *Safety Science* 102, p. 1-13.
- IACHINI, T. et al. (2016). « Peripersonal and interpersonal space in virtual and real environments : Effects of gender and age ». In : *Journal of Environmental Psychology* 45, p. 154-164.
- IMAI, T. et al. (2001). « Interaction of the body, head, and eyes during walking and turning ». In : *Experimental Brain Research* 136.1, p. 1-18.
- IVANENKO, Y. et al. (2002). « Control of foot trajectory in human locomotion : role of ground contact forces in simulated reduced gravity ». In : *Journal of Neurophysiology* 87.6, p. 3070-3089.
- JANSEN, S. E. M., A. TOET et N. J. DELLEMAN (2010). « Restricting the vertical and horizontal extent of the field-of-view : effects on manoeuvring performance ». In : *The Ergonomics Open Journal* 3.1.

- JANSEN, S. E., A. TOET et P. J. WERKHOVEN (2011). « Human locomotion through a multiple obstacle environment : strategy changes as a result of visual field limitation ». In : *Experimental Brain Research* 212.3, p. 449-456.
- JOVANCEVIC-MISIC, J. et M. HAYHOE (2009). « Adaptive gaze control in natural environments ». In : *Journal of Neuroscience* 29.19, p. 6234-6238.
- JUSLIN, P. et al. (2005). *The new handbook of methods in nonverbal behavior research*.
- KADONE, H., A. BERTHOZ et H. HICHEUR (2009). « Kinematic cues underlying expression and perception of emotion in human gait ». In : *IEEE RAS - Workshop on modeling, simulation and optimization of bipedal walking*, p. 8.
- KAISER, M. et L. MOWAFI (1993). « Optical specification of time-to-passage : Observer's sensitivity to global tau ». In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 19.5, p. 1028-1040.
- KATO, Y., T. KANDA et H. ISHIGURO (2015). « May I help you ?-Design of human-like polite approaching behavior ». In : *2015 10th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*. IEEE, p. 35-42.
- KATSUMATA, H. et D. M. RUSSELL (2012). « Prospective versus predictive control in timing of hitting a falling ball ». In : *Experimental brain research* 216.4, p. 499-514.
- KELLER, A. A. (2017). « Multi-objective optimization in theory and practice i : classical methods ». In : Bentham Science Publishers. Chap. Pareto optimality, p. 46-66.
- KELLY, J. W., L. A. CHEREP et Z. D. SIEGEL (2017). « Perceived space in the HTC Vive ». In : *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)* 15.1, p. 1-16.
- KENDON, A. (1990). *Conducting interaction : Patterns of behavior in focused encounters*. T. 7. CUP Archive.
- KITAZAWA, K. et T. FUJIYAMA (2010). « Pedestrian vision and collision avoidance behavior : Investigation of the information process space of pedestrians using an eye tracker ». In : *Pedestrian and evacuation dynamics 2008*. Springer, p. 95-108.
- KNORR, A. G. et al. (2016). « Influence of person-and situation-specific characteristics on collision avoidance behavior in human locomotion. » In : *Journal of experimental psychology : human perception and performance* 42.9, p. 1332.
- KÖNIG, P. et al. (2016). « Eye movements as a window to cognitive processes ». In : *Journal of Eye Movement Research* 9.5, p. 1-16.
- KOPITZSCH, R., D. CLEVER et K. MOMBAUR (2017). « Optimization-based analysis of push recovery during walking motions to support the design of rigid and compliant lower limb exoskeletons ». In : *Advanced Robotics* 31.22, p. 1238-1252.
- KROGMEIER, C., C. MOUSAS et D. WHITTINGHILL (2019). « Human, Virtual Human, Bump ! A Preliminary Study on Haptic Feedback ». In : *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, p. 1032-1033.
- KRUM, D. M., S.-H. KANG et T. PHAN (2018). « Influences on the Elicitation of Interpersonal Space with Virtual Humans ». In : *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, p. 223-9.
- KRUSE, T. et al. (2013). « Human-aware robot navigation : A survey ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 61.12, p. 1726-1743.
- LABAN, R. et L. ULLMANN (1971). « The mastery of movement. » In.
- LACQUANITI, F., C. TERZUOLO et P. VIVIANI (1983). « The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements ». In : *Acta Psychol* 54.1-3, p. 115-130.
- (1984). « Preparatory states and processes ». In : Kornblum S. & Requin J. Hillsdale. Chap. Global metric properties and preparatory processes in drawing movements, p. 357-370.

- LAJOIE, Y. et al. (1993). « Attentional demands for static and dynamic equilibrium ». In : *Experimental brain research* 97.1, p. 139-144.
- LALONDE-PARISI, M.-J. et A. LAMONTAGNE (2015). « Perception of self-motion and regulation of walking speed in young-old adults ». In : *Motor control* 19.3, p. 191-206.
- LEAMAN, J. et H. M. LA (2017). « A comprehensive review of smart wheelchairs : past, present, and future ». In : *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 47.4, p. 486-499.
- LEE, D., N. PORT et A. GEORGOPOULOS (1997). « Manual interception of moving targets : On-line control of overlapping submovements ». In : *Experimental Brain Research* 116.3, p. 421-433.
- LEE, D. (1976). « A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision ». In : *Perception* 5.4, p. 437-459.
- (1980). « Visuo-motor coordination in space-time ». In : *Tutorials in Motor Behaviour*. Stelmach, G. E. & Requin, J., p. 281-295.
- (1982). « Regulation of gait in long jumping ». In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 8.3, p. 448-59.
- LEE, D. et P. REDDISH (1981). « Plumeting gannets : a paradigm of ecological optics ». In : *Nature* 293, p. 293-294.
- LEE, D. et D. YOUNG (1985). « Visual timing of interceptive action ». In : *Brain Mechanisms and Spatial Vision*, p. 1-30.
- LEE, D. et al. (1983). « Visual timing in hitting an accelerating ball ». In : *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A* 35.2, p. 333-346.
- LEMERCIER, S. et al. (2012). « Realistic following behaviors for crowd simulation ». In : *Computer Graphics Forum*. T. 31. 2pt2. Wiley Online Library, p. 489-498.
- LHOMMET, M., D. LOURDEAUX et J.-P. BARTHÈS (2011). « Never alone in the crowd : A microscopic crowd model based on emotional contagion ». In : *2011 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*. T. 2. IEEE, p. 89-92.
- LICHTENTHÄLER, C. et A. KIRSCH (2013). « Towards legible robot navigation-how to increase the intend expressiveness of robot navigation behavior ». In : *Int. Conf. Soc. Robot. Embodied Commun Goals Intentions*.
- LIN, J. J., H. ABI-RACHED et M. LAHAV (2004). « Virtual guiding avatar : An effective procedure to reduce simulator sickness in virtual environments ». In : *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, p. 719-726.
- LIN, J.-W. et al. (2002). « Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment ». In : *Proceedings ieee virtual reality 2002*. IEEE, p. 164-171.
- LINKENAUER, S. A., H. H. BÜLTHOFF et B. J. MOHLER (2015). « Virtual arm' s reach influences perceived distances but only after experience reaching ». In : *Neuropsychologia* 70, p. 393-401.
- LINKENAUER, S. A. et al. (2013). « Welcome to wonderland : The influence of the size and shape of a virtual hand on the perceived size and shape of virtual objects ». In : *PloS one* 8.7, e68594.
- LOCKLIN, J. et al. (2010). « Measuring deficits in visually guided action post-concussion ». In : *Sports medicine* 40.3, p. 183-187.
- LOOMIS, J. M., J. J. BLASCOVICH et A. C. BEALL (1999). « Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology ». In : *Behavior research methods, instruments, & computers* 31.4, p. 557-564.
- LOOMIS, J. M., J. M. KNAPP et al. (2003). « Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments ». In : *Virtual and adaptive environments* 11, p. 21-46.

- LORD, S. R. et I. W. WEBSTER (1990). « Visual field dependence in elderly fallers and non-fallers ». In : *The International Journal of Aging and Human Development* 31.4, p. 267-277.
- LOUISON, C., F. FERLAY et D. R. MESTRE (2018). « Spatialized Vibrotactile Feedback Improves Goal-Directed Movements in Cluttered Virtual Environments ». In : *International Journal of Human-Computer Interaction* 34.11, p. 1015-1031.
- LUGRIN, J.-L., J. LATT et M. E. LATOSCHIK (2015). « Avatar anthropomorphism and illusion of body ownership in VR ». In : *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*. IEEE, p. 229-230.
- LUND, A. M. (2001). « Measuring usability with the USE questionnaire ». In : *Usability interface* 8.2, p. 3-6.
- LYNCH, S. D. et al. (2017). « Collision avoidance behavior between walkers : global and local motion cues ». In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* PP.99, p. 1-1. ISSN : 1077-2626. DOI : 10.1109/TVCG.2017.2718514.
- LYNCH, S. D. et al. (2018). « Effects of virtual human gaze behaviour during an orthogonal collision avoidance walking task ». In : *2018 IEEE Virtual Reality (VR)*. Reutlingen, Germany, pp.
- LYNCH, S. et al. (2019). « Collision avoidance between walkers with a twist : strategies for curvilinear and rectilinear paths. » In : *ISPGR, Poster session*. Edimburgh, Scotland.
- (2020). « Influence of path curvature on collision avoidance behaviour between two walkers. » In : *under review*.
- MADIGAN, R. et al. (2019). « Understanding interactions between Automated Road Transport Systems and other road users : A video analysis ». In : *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour* 66, p. 196-213.
- MARIGOLD, D. S. et A. E. PATLA (2007). « Gaze fixation patterns for negotiating complex ground terrain ». In : *Neuroscience* 144.1, p. 302-313.
- (2008). « Visual information from the lower visual field is important for walking across multi-surface terrain ». In : *Experimental Brain Research* 188.1, p. 23-31.
- MARTINI, D. N. et al. (2011). « The chronic effects of concussion on gait ». In : *Archives of physical medicine and rehabilitation* 92.4, p. 585-589.
- MCCREA, M. et al. (2013). « Incidence, clinical course, and predictors of prolonged recovery time following sport-related concussion in high school and college athletes ». In : *Journal of the International Neuropsychological Society : JINS* 19.1, p. 22.
- MCCRORY, P. et al. (2017). « Consensus statement on concussion in sport—the 5th international conference on concussion in sport held in Berlin, October 2016 ». In : *British journal of sports medicine* 51.11, p. 838-847.
- MCFADYEN, B. J., F. MALOUIN et F. DUMAS (2001). « Anticipatory locomotor control for obstacle avoidance in mid-childhood aged children ». In : *Gait & posture* 13.1, p. 7-16.
- MCMANUS, E. A. et al. (2011). « The influence of avatar (self and character) animations on distance estimation, object interaction and locomotion in immersive virtual environments ». In : *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on applied perception in graphics and visualization*, p. 37-44.
- MEERHOFF, L. A. et al. (2018a). « Collision avoidance with multiple walkers : Sequential or simultaneous interactions ? » In : *Frontiers in psychology* 9, p. 2354.
- MEERHOFF, L. A. et al. (2018b). « Guided by gaze : Prioritization strategy when navigating through a virtual crowd can be assessed through gaze activity ». In : *Acta psychologica* 190, p. 248-257.
- MEGHANATHAN, R. N., C. van LEEUWEN et A. R. NIKOLAEV (2015). « Fixation duration surpasses pupil size as a measure of memory load in free viewing ». In : *Frontiers in human neuroscience* 8, p. 1063.

- MELZER, A., T. SHAFIR et R. P. TSACHOR (2019). « How do we recognize emotion from movement? Specific motor components contribute to the recognition of each emotion ». In : *Frontiers in psychology* 10, p. 1389.
- MÉNARD, M. et al. (2019). « Impact of osteopathic manipulative treatment on range of motion of the pelvis during the one-sided tilt test : a pilot study ». In : *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 22.sup1, S436-S438.
- MERSKEY, H. et N. BOGDUK (1994). « Classification of chronic pain, IASP Task Force on Taxonomy ». In : *Seattle, WA : International Association for the Study of Pain Press (Also available online at www.iasp-pain.org)*.
- MESTRE, D. R., C. LOUISON et F. FERLAY (2016). « The contribution of a virtual self and vibrotactile feedback to walking through virtual apertures ». In : *International Conference on Human-Computer Interaction*. Springer, p. 222-232.
- MÉTIVET, T, L PASTORELLO et P PEYLA (2018). « How to push one's way through a dense crowd ». In : *EPL (Europhysics Letters)* 121.5, p. 54003.
- MICHEL, J et al. (2010). « Obstacle stepping in children : Task acquisition and performance ». In : *Gait & posture* 31.3, p. 341-346.
- MIRELMAN, A. et al. (2017). « Effects of aging on prefrontal brain activation during challenging walking conditions ». In : *Brain and cognition* 115, p. 41-46.
- MOHLER, B. J. et al. (2010). « The effect of viewing a self-avatar on distance judgments in an HMD-based virtual environment ». In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 19.3, p. 230-242.
- MONTEPARE, J. M., S. B. GOLDSTEIN et A. CLAUSEN (1987). « The identification of emotions from gait information ». In : *Journal of Nonverbal Behavior* 11.1, p. 33-42.
- MOSCHNER, C. et R. W. BALOH (1994). « Age-related changes in visual tracking ». In : *Journal of Gerontology* 49.5, p. M235-M238.
- MOUSSAÏD, M. et al. (2010). « The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics ». In : *PloS one* 5.4, e10047.
- MOUSSAÏD, M. et al. (2012). « Traffic instabilities in self-organized pedestrian crowds ». In : *PLoS Comput Biol* 8.3, e1002442.
- MULLER, A., C. PONTONNIER et G. DUMONT (2018). « The MusIC method : a fast and quasi-optimal solution to the muscle forces estimation problem ». In : *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering* 21.2, p. 149-160.
- MULLER, A. et al. (2019). « CusToM : a Matlab toolbox for musculoskeletal simulation ». In : *Journal of Open Source Software* 4.33, p. 1-3.
- MURGIA, A. et P. M. SHARKEY (2009). « Estimation of distances in virtual environments using size constancy ». In : *International Journal of Virtual Reality* 8.1, p. 67-74.
- NARAYANAN, V. K. et al. (2016). « Analysis of an adaptive strategy for equitably approaching and joining human interactions ». In : *2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. IEEE, p. 341-346.
- NETO, A. B. F., C. PELACHAUD et S. R. MUSSE (2017). « Giving emotional contagion ability to virtual agents in crowds ». In : *International Conference on Intelligent Virtual Agents*. Springer, p. 63-72.
- NOLIN, P. et al. (2012). « Virtual reality as a screening tool for sports concussion in adolescents ». In : *Brain injury* 26.13-14, p. 1564-1573.
- NUMMENMAA, L., J. HYÖNÄ et J. K. HIETANEN (2009). « I'll Walk This Way : Eyes Reveal the Direction of Locomotion and Make Passersby Look and Go the Other Way ». In : *Psychological Science* 20.12. PMID : 19883491, p. 1454-1458.

- NUMMENMAA, L. et al. (2012). « Emotions promote social interaction by synchronizing brain activity across individuals ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109.24, p. 9599-9604.
- OCHS, M., C. PELACHAUD et G. MCKEOWN (2017). « A User Perception-Based Approach to Create Smiling Embodied Conversational Agents ». In : *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS)* 7.1, p. 1-33.
- OLIVIER, A.-H. et A. CRÉTUAL (2009). « Curvature-velocity analysis to identify turning steps while walking ». In : *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 12.S1, p. 201-202.
- OLIVIER, A.-H. et al. (2009). « A velocity-curvature space approach for walking motions analysis ». In : *International Workshop on Motion in Games*. Springer, p. 104-115.
- OLIVIER, A.-H. et al. (2010). « Interaction between real and virtual humans during walking : perceptual evaluation of a simple device ». In : *Proceedings of the 7th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, p. 117-124.
- OLIVIER, A.-H. et al. (2011). « A step-by-step modeling, analysis and annotation of locomotion ». In : *Computer Animation and Virtual Worlds* 22.5, p. 421-433.
- OLIVIER, A.-H. et al. (2012). « Minimal predicted distance : A common metric for collision avoidance during pairwise interactions between walkers ». In : *Gait & posture* 36.3, p. 399-404.
- OLIVIER, A.-H. et al. (2013). « Collision avoidance between two walkers : Role-dependent strategies ». In : *Gait & posture* 38.4, p. 751-756.
- OLIVIER, A.-H. et al. (2014). « A virtual reality platform to study crowd behaviors ». In : *Transportation Research Procedia* 2, p. 114-122.
- OLIVIER, A.-H. et al. (2018). « Walking with virtual people : Evaluation of locomotion interfaces in dynamic environments ». In : *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 24.7, p. 2251-2263.
- OLIVIER, A.-H. et A. CRÉTUAL (2007). « Velocity/curvature relations along a single turn in human locomotion ». In : *Neuroscience Letters* 412.2, p. 148-153.
- ONISR (2019). « Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière ». In : *La sécurité routière en France. Bilan de l'Année 2018. La Documentation Française, Paris*.
- ORENDURFF, M. et al. (2006). « The kinematics and kinetics of turning : limb asymmetries associated with walking a circular path ». In : *Gait & Posture* 23.1, p. 106-111.
- ORGANIZATION, W. H. (2019). *WHO global report on traditional and complementary medicine 2019*. World Health Organization.
- PALMEIRO, A. R. et al. (2018). « Interaction between pedestrians and automated vehicles : A Wizard of Oz experiment ». In : *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour* 58, p. 1005-1020.
- PAN, X. et A. F. d. C. HAMILTON (2018). « Why and how to use virtual reality to study human social interaction : The challenges of exploring a new research landscape ». In : *British Journal of Psychology* 109.3, p. 395-417.
- PAQUETTE, M. R. et al. (2008). « Age-related modifications in steering behaviour : effects of base-of-support constraints at the turn point ». In : *Experimental Brain Research* 190.1, p. 1-9.
- PATLA, A., A. ADKIN et T. BALLARD (1999). « Online steering : coordination and control of body center of mass, head and body reorientation ». In : *Experimental Brain Research* 129.4, p. 629-634.
- PATLA, A., S. TOMESCU et M. ISHAC (2004). « What visual information is used for navigation around obstacles in a cluttered environment ». In : *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* 82.8-9, p. 682-92.

- PATLA, A. et al. (1991). « Visual control of locomotion : strategies for changing direction and for going over obstacles ». In : *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance* 17.3, p. 603-634.
- PATLA, A. E. (1997). « Understanding the roles of vision in the control of human locomotion ». In : *Gait & posture* 5.1, p. 54-69.
- PATLA, A. E., S. D. PRENTICE et L. T. GOBBI (1996). « Visual control of obstacle avoidance during locomotion : strategies in young children, young and older adults ». In : *Advances in Psychology*. T. 114. Elsevier, p. 257-277.
- PAYEN, J.-F. et al. (2001). « Assessing pain in critically ill sedated patients by using a behavioral pain scale ». In : *Critical care medicine* 29.12, p. 2258-2263.
- PELI, E. et al. (2016). « The risk of pedestrian collisions with peripheral visual field loss ». In : *Journal of vision* 16.15, p. 5-5.
- PELLICHERO, A. et al. (2019). « Cognitive Functioning : A Determinant of Safe and Effective Driving in Power Wheelchair ». In : *Brain Injury* 33, p. 55-55.
- PENNY, W. D. et al. (2011). *Statistical parametric mapping : the analysis of functional brain images*. Elsevier.
- PEPER, L. et al. (1994). « Catching balls : How to get the hand to the right place at the right time ». In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 20.3, p. 591-612.
- PERRINET, J., A.-H. OLIVIER et J. PETTRÉ (2013). « Walk with me : Interactions in emotional walking situations, a pilot study ». In : *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, p. 59-66.
- PFAFF, L. M. et M. E. CINELLI (2018). « Avoidance behaviours of young adults during a head-on collision course with an approaching person ». In : *Experimental brain research* 236.12, p. 3169-3179.
- PFEIL, K. et al. (2018). « A comparison of eye-head coordination between virtual and physical realities ». In : *Proceedings of the 15th ACM Symposium on Applied Perception*. ACM, p. 18.
- PHAM, Q. et al. (2007). « The formation of trajectories during goal-oriented locomotion in humans. II. A maximum smoothness model ». In : *European Journal of Neuroscience* 26.8, p. 2391-2403.
- PLUMERT, J. M., J. K. KEARNEY et J. F. CREMER (2004). « Children's perception of gap affordances : Bicycling across traffic-filled intersections in an immersive virtual environment ». In : *Child development* 75.4, p. 1243-1253.
- (2007). « Children's road crossing : A window into perceptual-motor development ». In : *Current Directions in Psychological Science* 16.5, p. 255-258.
- PORT, N. et al. (1997). « Manual interception of moving targets : Performance and movements initiation ». In : *Experimental Brain Research* 116.3, p. 406-420.
- POWERS, K. C., J. M. KALMAR et M. E. CINELLI (2014a). « Dynamic stability and steering control following a sport-induced concussion ». In : *Gait & Posture* 39.2, p. 728-732.
- (2014b). « Recovery of static stability following a concussion ». In : *Gait & posture* 39.1, p. 611-614.
- POZZO, T. et al. (1990). « Head stabilization during various tasks in humans. I. Normal subjects ». In : *Experimental Brain Research* 82.1, p. 97-106.
- PRÉVOST, P. et al. (2003). « Spatial invariance in anticipatory orienting behaviour during human navigation ». In : *Neuroscience Letters* 339.3, p. 243-247.
- PROFESSIONNELLES, R. (2008). « Douleur chronique : reconnaître le syndrome douloureux chronique, l'évaluer et orienter le patient ». In : *Consensus formalisé. Argumentaire*.

- PUIL, C., A. CRÉTUAL et A.-H. OLIVIER (2019). « Impact of a thin plantar orthopaedic insert on posture and locomotion ». In : *Neurophysiologie Clinique* 49.6, p. 454.
- RAD, S. R., G. H. de ALMEIDA CORREIA et M. HAGENZIEKER (2020). « Pedestrians' road crossing behaviour in front of automated vehicles : Results from a pedestrian simulation experiment using agent-based modelling ». In : *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour* 69, p. 101-119.
- RAPOS, V. et al. (2019). « Minimum predicted distance : Applying a common metric to collision avoidance strategies between children and adult walkers ». In : *Gait & posture* 72, p. 16-21.
- REDMON, J. et A. FARHADI (2018). « YOLOv3 : An Incremental Improvement ». In : *arXiv*.
- REGAN, D. (2002). « Binocular information about time-to-collision and time-to-passage ». In : *Vision Research* 42, p. 2479-2484.
- REMLAND, M. S., T. S. JONES et H. BRINKMAN (1995). « Interpersonal distance, body orientation, and touch : Effects of culture, gender, and age ». In : *The Journal of social psychology* 135.3, p. 281-297.
- RENNER, R. S., B. M. VELICHKOVSKY et J. R. HELMERT (2013). « The perception of egocentric distances in virtual environments-a review ». In : *ACM Computing Surveys (CSUR)* 46.2, p. 1-40.
- RIO, K. W., G. C. DACHNER et W. H. WARREN (2018). « Local interactions underlying collective motion in human crowds ». In : *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences* 285.1878, p. 20180611.
- RIO, K. W., C. K. RHEA et W. H. WARREN (2014). « Follow the leader : Visual control of speed in pedestrian following ». In : *Journal of vision* 14.2, p. 4-4.
- RIOS-MARTINEZ, J., A. SPALANZANI et C. LAUGIER (2015). « From proxemics theory to socially-aware navigation : A survey ». In : *International Journal of Social Robotics* 7.2, p. 137-153.
- ROBITAILLE, N. et al. (2017). « A Virtual Reality avatar interaction (VRai) platform to assess residual executive dysfunction in active military personnel with previous mild traumatic brain injury : proof of concept ». In : *Disability and Rehabilitation : Assistive Technology* 12.7, p. 758-764.
- RODRIGUES, S. T., N. C. GALVÃO et G. C. GOTARDI (2014). « Visual estimation of apertures for wheelchair locomotion in novices : perceptual judgment and motor practice ». In : *Psychology & Neuroscience* 7.3, p. 331-340.
- ROETHER, C. L. et al. (2009). « Critical features for the perception of emotion from gait ». In : *Journal of vision* 9.6, p. 15-15.
- ROSA, S. de la et M. BREIDT (2018). « Virtual reality : A new track in psychological research ». In : *British Journal of Psychology* 109.3, p. 427-430.
- ROSENGREN, K. S. et al. (2009). « Differences in gait complexity and variability between children with and without developmental coordination disorder ». In : *Gait & posture* 29.2, p. 225-229.
- ROTH, D. et M. E. LATOSCHIK (2019). « Construction of a Validated Virtual Embodiment Questionnaire ». In : *arXiv preprint arXiv :1911.10176*.
- ROTHENBÜCHER, D. et al. (2016). « Ghost driver : A field study investigating the interaction between pedestrians and driverless vehicles ». In : *2016 25th IEEE international symposium on robot and human interactive communication (RO-MAN)*. IEEE, p. 795-802.
- RUBO, M. et M. GAMER (2018). « Virtual reality as a proxy for real-life social attention ? » In : *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*. ACM, p. 81.
- RUSHTON, S. (1999). « Weighted combination of size and disparity : a computational model for timing a ball catch ». In : *Nature Neuroscience* 2.2, p. 186-190.

- RYMILL, S. et N. DODGSON (2005). « A Psychologically-Based Simulation of Human Behaviour ». In : *Theory and Practice of Computer Graphics*, p. 35-42.
- SAMSON, W. et al. (2011). « Foot mechanics during the first six years of independent walking ». In : *Journal of biomechanics* 44.7, p. 1321-1327.
- SANTOS, F. V. et al. (2020). « Virtual reality in concussion management : from lab to clinic ». In : *Journal of Clinical and Translational Research* 5.4, p. 148.
- SATAKE, S. et al. (2009). « How to approach humans ? Strategies for social robots to initiate interaction ». In : *Proceedings of the 4th ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*, p. 109-116.
- SCHEGGI, S., M. AGGRAVI et D. PRATTICHIZZO (2016). « Cooperative navigation for mixed human-robot teams using haptic feedback ». In : *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 47.4, p. 462-473.
- SCHMUCKLER, M. A. (1996). « Development of visually guided locomotion : Barrier crossing by toddlers ». In : *Ecological Psychology* 8.3, p. 209-236.
- SCHUEMIE, M. J. et al. (2001). « Research on presence in virtual reality : A survey ». In : *CyberPsychology & Behavior* 4.2, p. 183-201.
- SEGAL, A. D. et al. (2008). « Local dynamic stability in turning and straight-line gait ». In : *Journal of biomechanics* 41.7, p. 1486-1493.
- SHUMWAY-COOK, A. et M. WOOLLACOTT (2000). « Attentional demands and postural control : the effect of sensory context ». In : *Journals of Gerontology-Biological Sciences and Medical Sciences* 55.1, p. M10.
- SHUMWAY-COOK, A. et M. H. WOOLLACOTT (2007). *Motor control : translating research into clinical practice*. Lippincott Williams & Wilkins.
- SILVA, W. S. et al. (2019). « Effects of age on obstacle avoidance while walking and deciphering text versus audio phone messages ». In : *Gerontology* 65.5, p. 524-536.
- SILVA, W. S. et al. (2020). « Reading text messages at different stages of pedestrian circumvention affects strategies for collision avoidance in young and older adults ». In : *Gait & Posture* 76, p. 290-297.
- SINKE, C., M. E. KRET et B. de GELDER (2012). « Body language : Embodied perception of emotion. » In.
- SLATER, M. et al. (2010). « First person experience of body transfer in virtual reality ». In : *PloS one* 5.5, e10564.
- SLOBOUNOV, S., E. SLOBOUNOV et K. NEWELL (2006). « Application of virtual reality graphics in assessment of concussion ». In : *Cyberpsychology & behavior* 9.2, p. 188-191.
- SMITH, J. et G.-J. PEPPING (2010). « Effects of affordance perception on the initiation and actualization of action ». In : *Ecological Psychology* 22.2, p. 119-149.
- SNAPP-CHILDS, W. et G. P. BINGHAM (2009). « The affordance of barrier crossing in young children exhibits dynamic, not geometric, similarity ». In : *Experimental Brain Research* 198.4, p. 527-533.
- SNYDER, N. et al. (2019). « Collision avoidance between two walkers : Reduced avoidance behaviour in previously concussed athletes ». In : *Conference of the International Society for Posture and Gait Research (ISPGR)*.
- SOLANAS, M. P., M. J. VAESSEN et B. de GELDER (2020). « the role of computational and subjective features in emotional body expressions ». In : *Scientific reports* 10.1, p. 1-13.
- SØRENSEN, T. (1948). « A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analyses of the vegetation on Danish commons ». In.

- SPARROW, R. et M. HOWARD (2017). « When human beings are like drunk robots : Driverless vehicles, ethics, and the future of transport ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 80, p. 206-215.
- SREENIVASA, M. N. et al. (2008). « Walking along curved paths of different angles : the relationship between head and trunk turning ». In : *Experimental brain research* 191.3, p. 313-320.
- STEED, A. et al. (2016). « The impact of a self-avatar on cognitive load in immersive virtual reality ». In : *2016 IEEE Virtual Reality (VR)*. IEEE, p. 67-76.
- STRAUDI, S. et al. (2017). « The effects of video game therapy on balance and attention in chronic ambulatory traumatic brain injury : an exploratory study ». In : *BMC neurology* 17.1, p. 1-7.
- TAYLOR, M., P. DABNICHKI et S. STRIKE (2005). « A three-dimensional biomechanical comparison between turning strategies during the stance phase of walking ». In : *Human Movement Science* 24.4, p. 558-573.
- TEMPLER, J. (1992). « The staircase : studies of hazards, falls and safer design ». In : Cambridge, Mass. MIT Press. Chap. Human territoriality and space needs on stairs, p. 61-70.
- THALER, A. et al. (2018). « Visual perception and evaluation of photo-realistic self-avatars from 3D body scans in males and Females ». In : *Frontiers in ICT* 5, p. 18.
- THIGPEN, M. et al. (2000). « Turning difficulty characteristics of adults aged 65 years or older ». In : *Physical Therapy* 80.12, p. 1174-1187.
- TINETTI, M., T. WILLIAMS et R. MAYEWSKI (1986). « Fall risk index for elderly patients based on number of chronic disabilities. ». In : *American Journal of Medicine* 80.3, p. 429-434.
- TORKIA, C. et al. (2015). « Power wheelchair driving challenges in the community : a users' perspective ». In : *Disability and Rehabilitation : Assistive Technology* 10.3, p. 211-215.
- TRÉSILIAN, J. (1991). « Empirical and theoretical issues in the perception of time to contact ». In : *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance* 17.3, p. 865-876.
- TRESILIAN, J. (1999). « Visually timed action : time-out for 'tau' ? ». In : *Trends in Cognitive Sciences* 3.8, p. 301-310.
- TSAI, J. et al. (2012). « A study of emotional contagion with virtual characters ». In : *International Conference on Intelligent Virtual Agents*. Springer, p. 81-88.
- USOH, M. et al. (2000). « Using presence questionnaires in reality ». In : *Presence : Teleoperators & Virtual Environments* 9.5, p. 497-503.
- USTINOVA, K. et al. (2014). « Virtual reality game-based therapy for treatment of postural and coordination abnormalities secondary to TBI : a pilot study ». In : *Brain injury* 28.4, p. 486-495.
- VAILLAND, G. et al. (2020). « Vestibular Feedback on a Virtual Reality Wheelchair Driving Simulator : A Pilot Study ». In : *Proceedings of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, p. 171-179.
- VALLIS, L. et B. MCFADYEN (2003). « Locomotor adjustments for circumvention of an obstacle in the travel path ». In : *Experimental Brain Research* 152.3, p. 409-414.
- (2005). « Children use different anticipatory control strategies than adults to circumvent an obstacle in the travel path ». In : *Experimental Brain Research* 167.1, p. 119-127.
- VALLIS, L. et A. PATLA (2004). « Expected and unexpected head yaw movements result in different modification of gait and whole body coordination strategies ». In : *Experimental Brain Research* 157.XXX, p. 94-110.
- VALLIS, L., A. PATLA et A. ADKIN (2001). « Control of steering in the presence of unexpected head yaw movements ». In : *Experimental Brain Research* 138.1, p. 128-134.
- VAN DEN BERG, J. et al. (2011). « Reciprocal n-body collision avoidance ». In : *Robotics research*. Springer, p. 3-19.

- VARMA, K., S. J. GUY et V. INTERRANTE (2017). « Assessing the Relevance of Eye Gaze Patterns During Collision Avoidance in Virtual Reality ». In : *ICAT-EGVE 2017 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments*. Sous la dir. de R. W. LINDEMAN, G. BRUDER et D. IWAI. The Eurographics Association. ISBN : 978-3-03868-038-3. DOI : 10.2312/egve.20171352.
- VASSALLO, C. et al. (2017). « How do walkers avoid a mobile robot crossing their way ? » In : *Gait & posture* 51, p. 97-103.
- (2018). « How do walkers behave when crossing the way of a mobile robot that replicates human interaction rules ? » In : *Gait & posture* 60, p. 188-193.
- VASSER, M. et J. ARU (2020). « Guidelines for Immersive Virtual Reality in Psychological Research ». In : *Current Opinion in Psychology*.
- VELASCO, J. P. N. et al. (2019). « Studying pedestrians' crossing behavior when interacting with automated vehicles using virtual reality ». In : *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour* 66, p. 1-14.
- VIEILLEDENT, S. et al. (2001). « Relationship between velocity and curvature of a human locomotor trajectory ». In : *Neuroscience Letters* 305.1, p. 65-69.
- VIVIANI, P. et M. CENZATO (1985). « Segmentation and coupling in complex movements ». In : *Journal of Environmental Psychology* 11.6, p. 828-845.
- VIVIANI, P. et C. TERZUOLO (1982). « Trajectory determines movement dynamics ». In : *Neuroscience* 7, p. 431-437.
- VOLANTE, M. et al. (2016). « Effects of virtual human appearance fidelity on emotion contagion in affective inter-personal simulations ». In : *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 22.4, p. 1326-1335.
- VON SCHROEDER, H. P. et al. (1995). « Gait parameters following stroke : a practical assessment ». In : *Journal of rehabilitation research and development* 32, p. 25-25.
- WAGELS, L. et al. (2017). « Exogenous testosterone decreases men's personal distance in a social threat context ». In : *Hormones and Behavior* 90, p. 75-83.
- WANG, C., L. SHEN et W. WENG (2020). « Experimental study on individual risk in crowds based on exerted force and human perceptions ». In : *Ergonomics*, p. 1-15.
- WANN, J., P. EDGAR et D. BLAIR (1993). « Time-to-contact judgements in the locomotion of adults and preschool children ». In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 19.5, p. 1053-1065.
- WARREN, W. (1984). « Perceiving affordances : visual guidance of stair climbing ». In : *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance* 10.5, p. 683-703.
- (1998). « Visually controlled locomotion : 40 years later ». In : *Ecological Psychology* 10.3-4, p. 177-219.
- WARREN, W. H. et B. R. FAJEN (2008). « Behavioral dynamics of visually guided locomotion ». In : *Coordination : neural, behavioral and social dynamics*. Springer, p. 45-75.
- WARREN JR, W. H. et S. WHANG (1987). « Visual guidance of walking through apertures : body-scaled information for affordances. » In : *Journal of experimental psychology : human perception and performance* 13.3, p. 371.
- WATAMANIUK, S. N. et S. J. HEINEN (2003). « Perceptual and oculomotor evidence of limitations on processing accelerating motion ». In : *Journal of vision* 3.11, p. 5-5.
- WEBER, K. et al. (1998). « Motor learning in the "podokinetic" system and its role in spatial orientation during locomotion ». In : *Experimental Brain Research* 120.3, p. 377-385.
- WEERDESTeyN, V. et al. (2003). « Distraction affects the performance of obstacle avoidance during walking ». In : *Journal of motor behavior* 35.1, p. 53-63.

- WEINER, D. K. et al. (2006). *The relationship between pain, neuropsychological performance, and physical function in community-dwelling older adults with chronic low back pain*.
- WERNER, E. B. (1991). *Manual of visual fields*. Churchill Livingstone.
- WILDER, D. A. (1986). « Social categorization : Implications for creation and reduction of intergroup bias ». In : *Advances in experimental social psychology*. T. 19. Elsevier, p. 291-355.
- WILLEMSSEN, P. et al. (2004). « The effects of head-mounted display mechanics on distance judgments in virtual environments ». In : *Proceedings of the 1st Symposium on Applied perception in graphics and visualization*, p. 35-38.
- (2009). « The effects of head-mounted display mechanical properties and field of view on distance judgments in virtual environments ». In : *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)* 6.2, p. 1-14.
- WILMUT, K. et A. L. BARNETT (2011). « Locomotor behaviour of children while navigating through apertures ». In : *Experimental Brain Research* 210.2, p. 185-194.
- WILMUT, K., W. DU et A. L. BARNETT (2015). « How do i fit through that gap? Navigation through apertures in adults with and without developmental coordination disorder ». In : *PLoS One* 10.4, e0124695.
- WOJKE, N., A. BEWLEY et D. PAULUS (2017). « Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric ». In : *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. IEEE, p. 3645-3649. DOI : 10.1109/ICIP.2017.8296962.
- WOOD, T. A. et al. (2019). « Balance and gait alterations observed more than 2 weeks after concussion : A systematic review and meta-analysis ». In : *American journal of physical medicine & rehabilitation* 98.7, p. 566-576.
- WOODMAN, R. et al. (2019). « Gap acceptance study of pedestrians crossing between platooning autonomous vehicles in a virtual environment ». In : *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour* 67, p. 1-14.
- WOODS, R. et al. (2003). « Perceived collision with an obstacle in a virtual environment ». In : *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 44, Abstract 4321.
- WOOLLACOTT, M. et A. SHUMWAY-COOK (2002). « Attention and the control of posture and gait : a review of an emerging area of research ». In : *Gait & posture* 16.1, p. 1-14.
- WRIGHT, W. G. et al. (2017). « Assessing subacute mild traumatic brain injury with a portable virtual reality balance device ». In : *Disability and rehabilitation* 39.15, p. 1564-1572.
- YALÇIN, Ö. N. (2020). « Empathy framework for embodied conversational agents ». In : *Cognitive Systems Research* 59, p. 123-132.
- YAREMYCH, H. E. et S. PERSKY (2019). « Tracing physical behavior in virtual reality : A narrative review of applications to social psychology ». In : *Journal of Experimental Social Psychology* 85, p. 103845.
- YEE, N. et al. (2007). « The unbearable likeness of being digital : The persistence of nonverbal social norms in online virtual environments ». In : *CyberPsychology & Behavior* 10.1, p. 115-121.
- YILMAZ, E. et W. WARREN (1995). « Visual control of braking : A test of the τ hypothesis ». In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 21.5, p. 996-1014.
- ZAAL, F. T. et al. (2012). « Base on balls for the Chapman strategy : Reassessing Brouwer, Brenner, and Smeets (2002) ». In : *Attention, Perception, & Psychophysics* 74.7, p. 1488-1498.
- ZHUANG, X. et C. WU (2012). « The safety margin and perceived safety of pedestrians at unmarked roadway ». In : *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour* 15.2, p. 119-131.
- ZUKOWSKI, L. A. et al. (2020). « Effect of the environment on gait and gaze behavior in older adult fallers compared to older adult non-fallers ». In : *PLoS one* 15.3, e0230479.