



**HAL**  
open science

# Interactions multiples entre marcheurs lors d'une tâche d'évitement de collision

Alexandre Vu

► **To cite this version:**

Alexandre Vu. Interactions multiples entre marcheurs lors d'une tâche d'évitement de collision. Sciences du Vivant [q-bio]. 2017. dumas-01664984

**HAL Id: dumas-01664984**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01664984>**

Submitted on 26 Jun 2018

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



**Université Rennes 2 – Haute Bretagne**

UFR Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Master 2 - Mouvement Sport Santé

# Interactions multiples entre marcheurs lors d'une tâche d'évitement de collision

---

Mémoire présenté par :

**VU Alexandre**

Tuteurs professionnels : PETTRE Julien, MEERHOFF Laurentius

Tuteur Universitaire : Anne-Hélène Olivier

Année Universitaire : 2016-2017

## **Résumé**

Pour modéliser le comportement d'un piéton dans un milieu encombré, il est important de comprendre comment ce piéton interagit avec plusieurs éléments présents simultanément autour de lui. Ce mémoire s'intéresse donc à la tâche d'évitement de collision réalisée par un marcheur lors d'une interaction de type 1 vs. 2. L'objectif de l'étude est d'observer si un marcheur traite de manière simultanée ou séquentielle les multiples interactions qui s'offrent à lui. Une expérimentation en milieu virtuel nous a permis de comparer le comportement de participants dans une tâche d'évitement d'un seul marcheur virtuel et dans une tâche d'évitement de deux marcheurs virtuels. En observant différentes stratégies d'adaptations motrices entre ces deux tâches, nous concluons que les participants ont pu interagir de manière simultanée avec les deux marcheurs virtuels. Cependant ceci n'est pas observé dans la totalité des essais avec deux marcheurs virtuels à éviter, de nouvelles expérimentations sont donc à réaliser pour déterminer quels facteurs influencent le comportement d'un marcheur pour résoudre de multiples interactions.

**Mots clefs :** Piéton, évitement de collision, traitement de multiples interactions, ordre de croisement, environnement virtuel

## **Abstract**

To model walker's behaviour into a clustered environment, it is inescapable to understand how a walker interacts with several surrounding elements that are simultaneously present. This work focus on collision avoidance task performed by a walker during a 1 vs. 2 interaction. The purpose of this study is to observe if a walker treats simultaneously or sequentially multiple interactions. A virtual environment experiment allowed us to compare participant's behaviour during pairwise interaction and during a 1 vs. 2 interaction. The different walking adaptations between these two kinds of interaction allow us to state that participant might have performed simultaneous treatment to interact with two virtual walkers. But simultaneous treatment isn't observed in all trials with two virtual walkers to avoid, so futur experimental protocols have to be set up to highlight factors that influence walker's behaviour during multiple interactions.

**Keywords:** walker, collision avoidance, multiple interactions treatment, crossing order, virtual environment

# Sommaire

Introduction .....	5
Etat de l'art .....	7
Partie I : Evitement de collision avec un seul marcheur .....	7
Détection du risque de collision .....	7
Stratégies mises en place dans l'évitement de collision.....	9
Les facteurs d'influences du comportement des marcheurs.....	11
Partie II : Evitement de collision avec plusieurs marcheurs .....	12
L'approche microscopique .....	12
Interactions avec plusieurs obstacles.....	14
Partie III : Outils d'analyse des interactions entre piétons.....	16
L'oculomètre .....	16
L'environnement virtuel.....	17
Synthèse et objectifs.....	20
Méthodologie générale.....	22
Présentation de l'expérimentation.....	22
Participants .....	22
Equipements .....	22
Consignes aux participants.....	23
Configuration expérimentale.....	23
Paramètres généraux .....	23
Stimuli et conditions expérimentales .....	24
Autres paramètres expérimentaux .....	26
Déroulement.....	26
Analyses des données.....	27

Variables mesurées.....	27
Analyse Statistique.....	27
Résultats .....	28
Nombre de collisions.....	28
Nombre d'inversions de l'ordre de croisement entre les participants et A1 .....	29
Interaction entre inversion et collision .....	30
Profils de vitesse.....	32
Distances de croisement .....	33
Discussion .....	34
Hypothèse 1.....	34
Collisions.....	35
Inversion de l'ordre de croisement.....	35
Interaction entre inversion et collision .....	36
Hypothèse 2.....	37
Vitesse de déplacement .....	37
Distance de croisement.....	38
Poursuite de l'analyse de données.....	38
Analyse cinématique .....	39
Analyse oculométrique.....	39
Limites.....	39
Conclusion & Perspectives.....	41
Bibliographie.....	42
Annexes.....	45

## Introduction

Dans la vie active ou dans le monde sportif, chaque individu interagit avec les éléments avoisinants de l'environnement pour accomplir une tâche précise. Effectivement, il est impossible pour un piéton d'ignorer un banc, un chat ou un autre piéton présent sur sa route afin de rejoindre un lieu souhaité sans se blesser ou blesser autrui. De même pour le rugbyman qui ne peut atteindre la zone d'en-but adverse sans tenir compte de ses coéquipiers et adversaires. Afin de réagir adéquatement à ces différents éléments qui évoluent simultanément dans l'environnement, chaque individu s'appuie sur ses facultés perceptives, et particulièrement sur ses perceptions visuelles. Cependant à l'image de la figure 1, en fonction de la densité des éléments avoisinants, le nombre d'interactions à percevoir et à traiter peut être multiplié de façon exponentielle, complexifiant ainsi la tâche de navigation.



**Figure 1 : Exemple d'interactions entre marcheurs dans le quartier de Shibuya à Tokyo**

Différentes études scientifiques ont ainsi été menées depuis plusieurs années pour comprendre comment un individu réussit à traiter toutes ces interactions. Dans le cadre particulier de la marche, on cherche à comprendre comment les individus peuvent naviguer tous ensemble, dans des environnements parfois restreints, en évitant toute collision. Les connaissances actuelles sur les interactions entre marcheurs permettent d'améliorer le réalisme des modèles microscopiques de simulation de foule, c'est-à-dire considérant les interactions à un niveau local, qui seront utilisés dans des films ou encore dans l'architecture civile.

La qualité de la modélisation des interactions entre piétons repose sur le développement des connaissances à propos des causes et facteurs responsables des comportements observables. Par exemple à l'image de la figure 1, il existe un nombre redondant de trajectoires empruntables par un piéton pour traverser ce carrefour. Mais aucune donnée scientifique n'est en mesure aujourd'hui d'expliquer le choix d'une trajectoire spécifique parmi toutes celles possibles. Il est tout de même reconnu que la trajectoire globale d'un piéton résulte des multiples adaptations issues des interactions locales auxquelles il est confronté. C'est pourquoi l'objectif de ce mémoire est de mieux comprendre le traitement de multiples interactions par un individu dans une tâche locomotrice, et plus précisément lors de l'évitement de collision. Nous chercherons plus précisément à comprendre si un piéton traite les interactions de façon simultanée ou séquentielle. Cette problématique s'inscrit dans un projet de post-doctorat de Laurentius Meerhoff dans lequel nous souhaitons répondre à cette question en s'intéressant à la fois aux trajectoires réalisées par le marcheur et à son comportement oculomoteur. Ce travail de Master portera uniquement sur l'analyse des trajectoires de marche.

Dans un premier temps, il est important de faire un état de l'art sur les notions exprimées précédemment. Nous présenterons les travaux menés sur les interactions entre piétons, dans le cadre d'un évitement de collision avec un seul autre marcheur, puis dans le cadre d'évitement de plusieurs marcheurs. Ensuite nous présenterons les outils utilisés aujourd'hui dans l'étude des interactions humaines. Dans un second temps, nous dresserons le bilan de la littérature qui nous permettra d'expliquer les objectifs de ce mémoire. Dans un troisième temps nous présenterons notre protocole expérimental, issu d'une collaboration entre l'équipe LAGADIC et MimeTIC de l'INRIA. Enfin nous présenterons nos résultats et les discuterons avant de conclure.

# Etat de l'art

Cette revue d'articles va présenter de façon non exhaustive certains travaux scientifiques réalisés en lien avec les interactions entre piétons. Dans ce mémoire, par interaction nous entendons la réaction mutuelle d'un acteur et d'un élément de l'environnement. Les interactions entre marcheurs peuvent être de diverses natures à l'image du suivi, de la rencontre, de la marche en groupe ou encore de l'évitement de collision. C'est sur cette dernière forme d'interaction que le mémoire va se focaliser.

## Partie I : Evitement de collision avec un seul marcheur

Il est important de revenir sur l'interaction simple entre deux marcheurs pour décrire la tâche d'évitement de collision. Nous allons dans un premier temps présenter certaines variables utilisées pour détecter le risque de collision, puis décrire les stratégies motrices mises en place pour réaliser cette tâche d'évitement et enfin mettre en évidence les facteurs d'influence qui régulent les ajustements locomoteurs.

### Détection du risque de collision

L'évitement d'un obstacle n'est initié que si et seulement si cela est nécessaire, i.e., si le risque de collision est suffisamment important (Olivier et al., 2012). Différents travaux ont alors proposé certaines théories pour expliquer comment ce risque de collision peut être évalué (Cutting et al., 1995 ; Olivier et al., 2012). La détection du risque de collision par un marcheur n'est possible que grâce à l'interprétation des indices visuels qu'il perçoit de l'environnement. Nous ne rentrerons pas dans les détails des processus de perception-action qui régulent le comportement humain. Mais retenons que la vision procure au marcheur une source indispensable d'informations sur le comportement des éléments environnants ainsi que sur son propre mouvement pour guider sa locomotion (Patla, 1997).

Des premiers travaux de recherches soutiennent qu'un marcheur évalue le risque de collision grâce à l'évolution de l'angle de gisement (Cutting et al., 1995). L'angle de gisement correspond à l'angle entre la direction actuelle de marche et la direction vers l'obstacle (Fig. 2). Ainsi, si la dérivée de l'angle de gisement est nulle, c'est-à-dire que l'obstacle est perçu sous un angle constant, alors une collision aura lieu si aucun des marcheurs n'adapte sa trajectoire de marche (Fig. 2, milieu). Si la dérivée est positive, c'est-à-dire que l'angle augmente, alors l'observateur passera en second au croisement (Fig. 2, gauche) et si la dérivée

est négative, c'est-à-dire que l'angle diminue, alors l'observateur passera en premier (Fig. 2, droite).

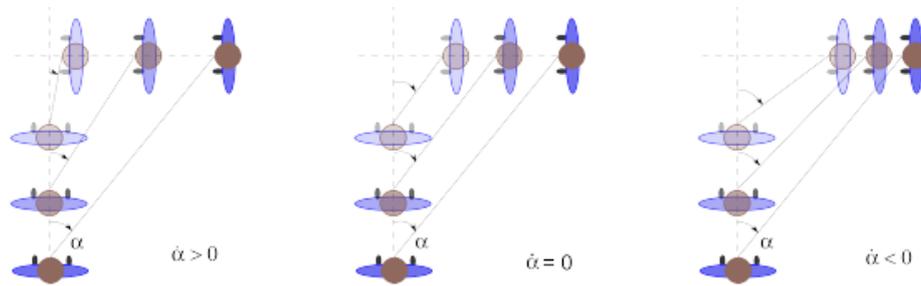


Figure 2 : La dérivée de l'angle de gisement ( $\alpha$ ) informe le marcheur sur son interaction avec un objet mobile. Si la valeur est positive l'observateur passera après l'obstacle, si elle est nulle une collision aura lieu et si elle est négative l'observateur passera avant (Ondrej et al., 2010)

Des travaux plus récents ont mis en avant la variable MPD (*Minimal Predicted Distance*) pour décrire comment les marcheurs président le risque de collision (Olivier et al., 2012 ; 2013). Elle correspond à la distance minimale future qui séparera les deux marcheurs si aucune adaptation motrice ne se produit (Olivier et al., 2012). Elle est extrapolée linéairement à partir des positions, vitesses et orientations respectives des deux marcheurs (Fig. 3). Les résultats d'expérimentations ont montré que les participants mesuraient précisément le risque de collision (Olivier et al., 2012). Les adaptations motrices sont initiées dès lors que cette future distance de croisement, à l'instant où les marcheurs peuvent se voir, est inférieure à 1m pour l'augmenter jusqu'à une distance admissible (Fig. 4) (Olivier et al., 2012).

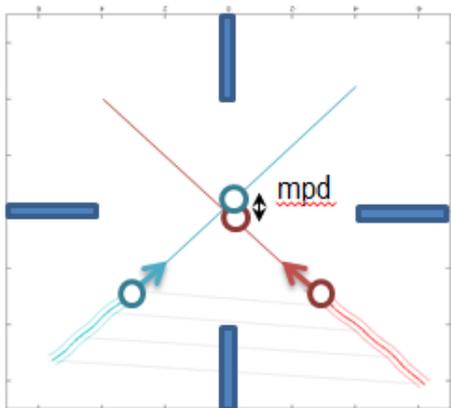


Figure 3 : Extrapolation de la MPD à partir de l'état courant des deux marcheurs.

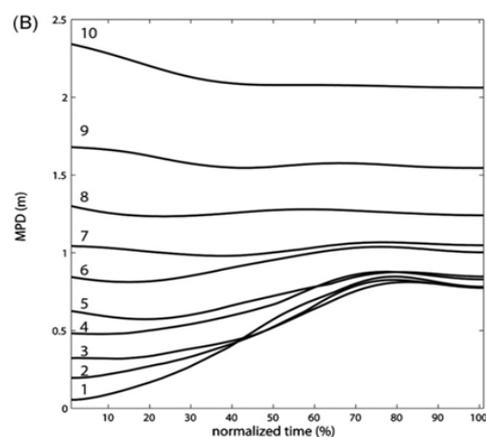


Figure 4 : Evolution de la MPD au cours de l'interaction à partir de différentes valeurs initiales (Olivier et al., 2012).

Donc une fois qu'un risque de collision est détecté, les marcheurs exécutent différentes stratégies d'évitement que nous allons maintenant pouvoir décrire.

### **Stratégies mises en place dans l'évitement de collision**

En fonction des caractéristiques de l'obstacle à éviter, il est possible de l'enjamber (Marigold et al., 2007 ; Gérin-Lajoie et al., 2005), de le contourner (Fajen & Warren 2003 ; Gérin-Lajoie et al., 2005) ou encore de le traverser (Cinelli et al., 2008). Lorsque l'obstacle correspond à un marcheur, il est évident que le contournement est la stratégie utilisée pour réaliser l'évitement de collision. L'interaction physique avec un autre marcheur laisse la possibilité de combiner régulation de vitesse et déviation de trajectoire afin de réaliser ce contournement. Mais plusieurs travaux ont pu alors montrer des comportements stéréotypés et non aléatoires de la part des participants pour éviter un piéton en mouvement (Basili et al., 2013 ; Huber et al., 2014 ; Olivier et al., 2012). Différentes théories s'opposent alors pour déterminer les stratégies de contrôle qui sous-tendent ces adaptations motrices.

Le concept de dynamique comportementale se base sur une théorie d'un contrôle exclusivement réactif du comportement humain (Fajen et Warren., 2003). Le comportement d'un marcheur évolue tel un système dynamique où le but à rejoindre est considéré comme attractif et les obstacles à éviter comme répulsifs (Fajen et Warren, 2003). Par exemple, plus on se rapproche d'un obstacle, plus la déviation de trajectoire sera importante. Et plus l'angle entre la direction de marche et la direction du but est grand, plus la réorientation vers le but sera importante. Cependant, dans ce concept, les variations de vitesses du marcheur qui perçoit son environnement sont négligées, or elles peuvent être essentielles dans la résolution de certaines interactions (Huber et al., 2014).

En opposition à une telle théorie, une étude s'intéressant à la notion d'espace personnel laisse entendre que les marcheurs emploient d'avantage une stratégie d'adaptation du comportement de nature anticipatoire (Gérin-Lajoie et al., 2005). Cet espace personnel correspond à une zone elliptique, plus longue (environ 2,00m) que large (environ 0,50m de chaque côté), autour du marcheur dans laquelle aucun élément de l'environnement ne doit pénétrer (Fig. 5) (Gérin-Lajoie et al., 2005). Les dimensions de cet espace peuvent varier en fonction de l'environnement et/ou de l'attention du marcheur (Gérin-Lajoie et al., 2008).

Même si l'initiation de l'évitement de collision est de nature réactionnelle, il semblerait que la réalisation est d'avantage de nature anticipatoire (Gérin-Lajoie et al., 2005). En effet, le fait que l'espace personnel ait une forme arrondie montre que les marcheurs ne réagissent pas brutalement à ce qu'ils perçoivent mais anticipent les adaptations futures nécessaires pour contourner l'obstacle. De plus, il semble que

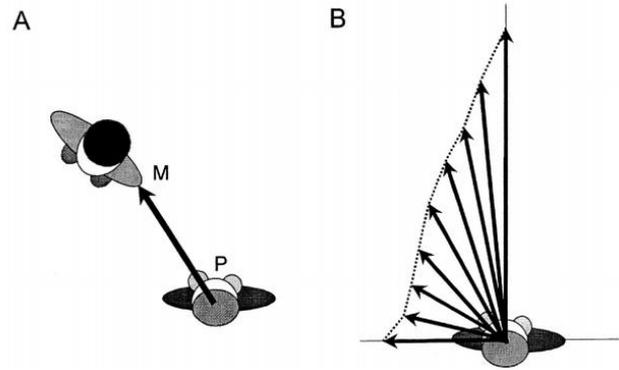


Figure 5 : (A) distance entre le centre de masse d'un sujet et l'épaule d'un mannequin. (B) l'évolution de cette distance décrit l'espace personnel d'un marcheur (Gérin-Lajoie et al., 2005).

l'initiation des adaptations motrices est retardée lorsque le comportement de l'obstacle est incertain, et donc plus difficile à anticiper. Dans ces conditions, le marcheur ralentit pour gagner un temps supplémentaire pour résoudre l'interaction (Gérin-Lajoie et al., 2005).

Pour rejoindre ce dernier point nous allons observer l'évolution de la MPD au cours de l'interaction (Fig. 6). L'évolution de cette variable rend compte des adaptations de la trajectoire des marcheurs. Nous pouvons décrire ainsi trois phases dans l'interaction : une phase d'observation, une phase de réaction et une dernière phase de régulation (Olivier et al., 2013). La phase d'observation correspond à la période nécessaire pour percevoir un éventuel risque de collision avant d'entamer un quelconque ajustement locomoteur. La phase de réaction correspond à une augmentation de la MPD(t) jusqu'à une distance de croisement future acceptable d'au moins 0,80m. L'augmentation de MPD(t) résulte des ajustements locomoteurs des deux marcheurs pour éviter la collision en augmentant la future distance de croisement. Et enfin la phase de régulation correspond au plateau de MPD après le dernier ajustement locomoteur jusqu'au croisement (Olivier et al., 2013). Cette phase de régulation montre que le contournement est résolu en avance dans l'interaction puisque les marcheurs ne modifient plus leur trajectoire locomotrice, ce qui soutient également une stratégie de contrôle de nature anticipatoire (Olivier et al., 2013).

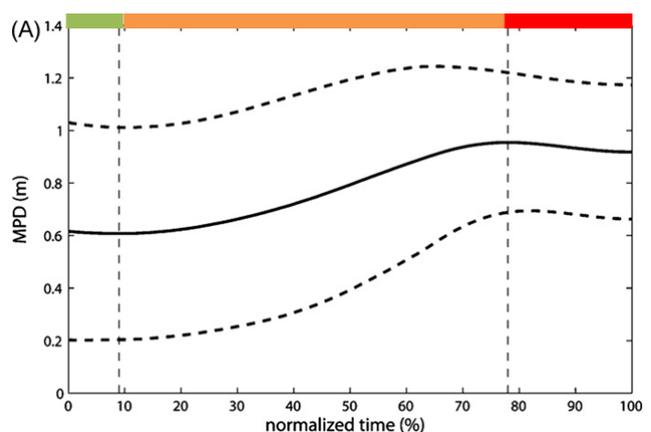


Figure 6 : Evolution de la MPD au cours de l'interaction. Vert : phase d'observation, Orange : phase de réaction et Rouge : phase de régulation (adapté de Olivier et al., 2012).

Ces différentes stratégies de contrôle ne sont que partiellement connues. Pour donner d'autres exemples, certaines théories ont proposé que la trajectoire globale du corps correspond à celle qui minimise le coût associé (Pham et al., 2007). Cependant ceci n'est pas retrouvé dans la tâche d'évitement d'un piéton (Basili et al., 2013). Donc pour pouvoir modéliser finement le comportement des marcheurs, il est important de connaître les facteurs qui pourraient avoir une influence.

### Les facteurs d'influences du comportement des marcheurs

A première vue, les facteurs internes pourraient avoir un effet relatif sur le comportement des marcheurs, comme l'âge, le genre, le gabarit, ou encore la culture. Mais il semblerait néanmoins que ce soient les facteurs externes qui soient les plus influents (Knorr et al., 2016).

Plus précisément, les caractéristiques situationnelles qui décrivent l'interaction entre deux piétons vont fortement influencer le comportement des deux marcheurs. Plus l'interaction est complexe, plus les adaptations nécessaires seront importantes (Huber et al., 2014). Par exemple, une simple déviation de trajectoire est suffisante pour contourner un marcheur arrivant de face (Fig. 7 droite). Cependant il faudra combiner ajustements de vitesse et d'orientation pour éviter un marcheur qui arrive sur le côté d'un angle relativement fermé (Fig. 7 gauche). L'ajustement de vitesse permet de gagner un laps de temps supplémentaire pour résoudre les interactions complexes, où l'anticipation est plus difficile (Huber et al., 2014). Notons à ce titre que le risque de collision peut ainsi être caractérisé, non seulement par une distance future de croisement, mais également par le temps restant avant l'atteinte de cette distance minimal d'interaction.

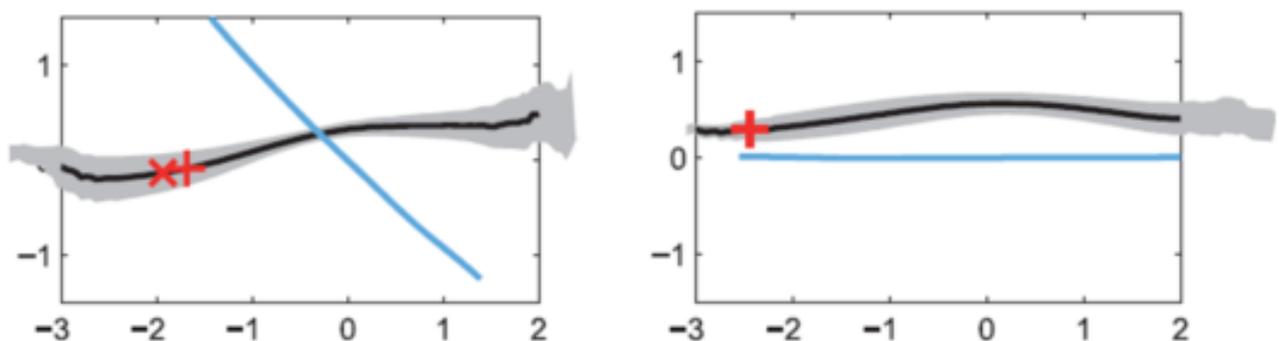


Figure 7 : Interaction entre un marcheur actif (trajectoire noire) et un marcheur passif (trajectoire bleue) (Huber et al., 2014). A gauche : le marcheur passif arrive de la gauche avec un angle de 45°. A droite : le marcheur passif arrive de face. + : début de la déviation de trajectoire. X : début de la régulation de ralentissement.

De plus, les caractéristiques situationnelles vont déterminer un ordre de croisement entre les deux marcheurs (Olivier et al., 2013 ; Knorr et al., 2016). Effectivement, relativement tôt dans l'interaction, un marcheur est apte à savoir s'il est en avance ou en retard par rapport à l'autre pour rejoindre le point de croisement. Les travaux sur les interactions entre piétons ont montré que, dans une tâche d'évitement de collision entre deux marcheur, cet ordre de passage est préservé jusqu'au croisement (Olivier et al., 2013 ; Knorr et al., 2016). La probabilité de préserver cet ordre de croisement augmente lorsque le temps restant avant l'interaction diminue et lorsque la valeur absolue de la future distance de croisement est éloignée de zéro (Knorr et al., 2016).

De plus, même si l'interaction est résolue de manière mutuelle, il semblerait que l'ordre de passage attribue un rôle différent dans l'interaction : le marcheur passant en second contribue d'avantage dans la tâche d'évitement de collision, en modifiant sa vitesse et son orientation, tandis que le marcheur passant en premier ne modifie que son orientation (Olivier et al., 2013).

A travers cette première partie de revue d'articles, nous avons pu décrire la tâche d'évitement de collision entre deux piétons, de son initiation à sa résolution et en passant par les facteurs qui l'influençaient. Cependant, lorsque l'on se déplace dans la rue, nous devons interagir avec de nombreux piétons. C'est pourquoi dans cette seconde partie de revue de littérature, nous allons nous intéresser aux études qui ont considéré le cas des interactions multiples.

## **Partie II : Evitement de collision avec plusieurs marcheurs**

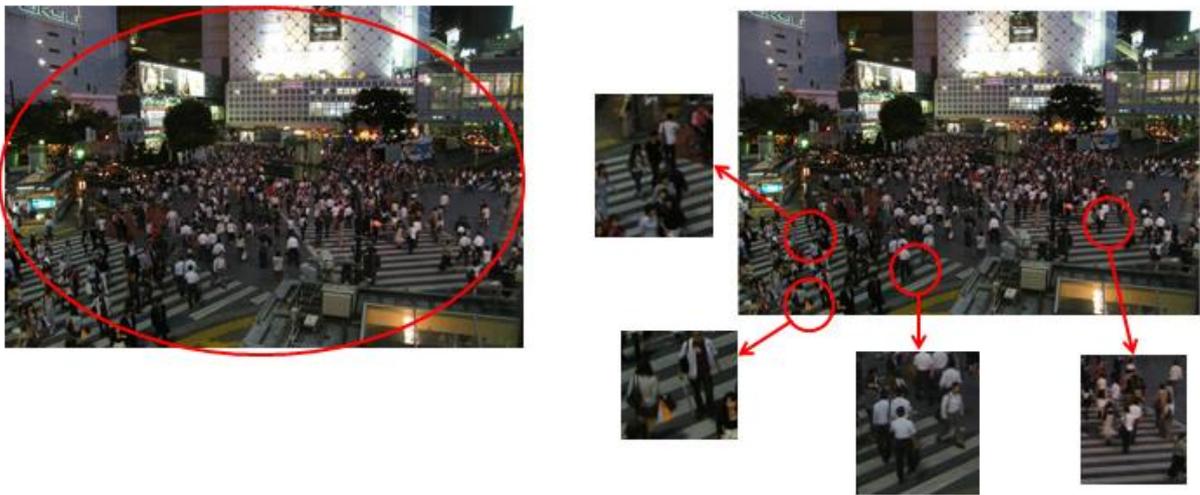
Dans cette partie nous explorerons les travaux dirigés vers les interactions multiples entre marcheurs. Dans un premier temps, nous nous intéresserons aux approches utilisées dans le domaine de l'animation de foule en décrivant en particulier l'approche microscopique pour simuler le comportement humain et en illustrant notre propos par quelques modèles de simulation. Puis dans un second temps nous présenterons les limites d'une telle approche et tenterons de proposer quelques alternatives.

### **L'approche microscopique**

L'étude de multiples interactions entre piétons est une problématique régulièrement rencontrée dans les études de simulations de foule de piétons mais qui est difficile à réaliser sur le terrain. A l'inverse des modèles macroscopiques, qui tentent de représenter le comportement d'une foule de manière globale (Duives et al., 2013, Kormanova, 2014), les

modèles microscopiques s'intéressent aux interactions locales entre les agents qui vont participer à l'émergence d'un comportement global de foule (Fig. 8).

Cette seconde approche, qui a fait l'objet de comparaisons entre trajectoires simulées et trajectoires réelles, semble plus précise et proche des comportements réels observables (Duives et al., 2013 ; Kormanova, 2014), c'est pourquoi nous focaliserons notre attention sur celle-ci dans cette revue d'articles. Les modèles de simulation se sont basés initialement sur des hypothèses sociales mettant en jeu des lois physiques tenant compte des positions (Helbing et Molnar, 1995) ou encore géométriques tenant compte des vitesses (van Den Berg et al., 2008).



**Figure 8 : Modèle macroscopique (à gauche) vs Modèle microscopique (à droite). Tandis que le modèle macroscopique considère la foule dans son ensemble, le modèle microscopique va s'intéresser aux interactions locales qui interviennent au sein de cette foule.**

Le modèle basé-vision (Ondrej et al., 2010) propose une alternative intéressante inspirée des principes d'évitement de collision émis par Cutting et al. (1995) et se base sur des variables optiques. Les interactions locales entre un agent virtuel et son environnement sont alors décrites grâce à une vision synthétique qui est implémentée à l'agent (Fig. 9). Un agent perçoit chaque obstacle de l'environnement sous un angle  $\alpha$  (angle de gisement), et est capable de déterminer s'il peut rentrer en collision avec celui-ci (dérivée de  $\alpha$ ) et à quel moment (TTC).

Sur la figure 9, le vert correspond à des valeurs proches de zéro, c'est-à-dire à une faible dérivée de l'angle de gisement (Fig. 9, à gauche) ou à un temps restant avant d'interagir avec l'élément très court (Fig. 9, à droite). La combinaison de ces deux images donne un résultat

qui décrit en vert le prochain élément à éviter (Fig. 9, en bas). Le rouge détermine les éléments avec un faible risque de collision (Fig. 8, à gauche) ou ceux dont l'interaction n'est pas imminente (Fig. 9, à droite). Le jaune décrit les éléments proches mais qui ne représentent pas un risque de collision (Fig. 9, en bas).

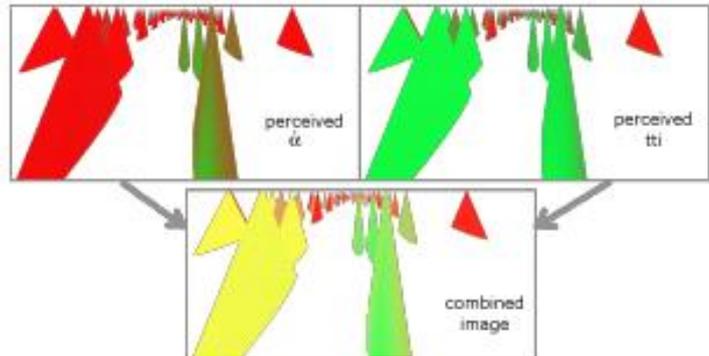


Figure 9 : La vision synthétique permet l'association de la dérivée de l'angle de gisement (à gauche), et du TTC (à droite) pour informer un agent sur son risque de collision (en bas) (Ondrej & al., 2010).

La difficulté avec cette approche est donc de comprendre comment se combinent les interactions entre elles pour réguler le comportement des marcheurs.

### Interactions avec plusieurs obstacles

Traverser un carrefour de routes avec un trafic dense nécessite d'emprunter un intervalle suffisamment large pour ne pas être percuté par une voiture en approche. La taille de l'intervalle nécessaire va dépendre de la vitesse des voitures en mouvement. Il est donc essentiel de connaître le comportement des voitures (au moins deux) formant l'intervalle (Chihak et al., 2010 ; Louveton et al., 2012). De façon évidente nous pouvons supposer que pour réussir une telle tâche, nous prenons en compte plus d'un élément à la fois.

Pour revenir sur les interactions entre piétons, il semblerait que la densité d'éléments à éviter va influencer le choix des trajectoires à emprunter (Moussaid et al., 2011 ; Bruneau et al., 2015). Les travaux de Bruneau et collaborateurs ont montré qu'un humain préférera ainsi traverser un groupe d'agents virtuels dispersés (densité faible) même si cela implique plusieurs interactions et, à l'inverse, contourner un groupe d'agents resserrés même si cela rallonge sa distance de marche (Bruneau et al., 2015). Au final, le choix répondrait au « *principe d'énergie minimum* » qui soutient que l'on choisit le chemin qui optimise le coup énergétique. Un tel choix nécessite de prendre en considération plusieurs éléments de l'environnement de façon simultanée pour adapter sa trajectoire.

Au sein d'une foule de piétons, le nombre d'interactions possibles augmente avec le nombre d'individus présents. Mais même si les piétons ne communiquent pas verbalement entre eux, il semblerait qu'un niveau de contrôle de haut niveau les mène à coordonner leur comportement respectif (Riley et al., 2011). Nous n'observons pas de répétitions d'interactions entre paires de piétons mais bien la formation d'une synergie qui régule les

mouvements interpersonnels (Riley et al., 2011). Cette théorie est retrouvée dans le monde sportif pour expliquer la coordination inter joueurs d'une même équipe (Araujo et Davids, 2016). Une telle théorie se base sur deux principes qui sont les suivants : compression des dimensions et compensation réciproque (Riley et al., 2011).

Si nous considérons chaque interaction possible comme un degré de liberté, le principe de compression des dimensions propose que ces degrés de liberté ne soient pas indépendants mais couplés les uns aux autres (Fig. 10). En d'autres mots, sous certaines contraintes, probablement sociales, les membres d'un groupe aussi informel soit-il, évoluent ensemble et non séparément. Ainsi la synergie émergente comporte moins de degrés de liberté, ou d'interactions, que d'éléments qui constituent le groupe (Riley et al., 2011 ; Araujo et Davids, 2016).

La compensation réciproque soutient l'habileté d'un membre du groupe à réagir au comportement des autres (Riley et al., 2011). En d'autres mots, si l'on considère qu'un groupe de piétons possède un objectif global, l'action de chaque membre de ce groupe doit être équivalente. La compensation réciproque propose que si l'un des agents se comporte différemment, les autres s'adaptent pour assurer un équilibre dans le comportement global du groupe pour atteindre l'objectif commun (Riley et al., 2011).

Suivant cette théorie de synergie interpersonnelle, les interactions entre plusieurs piétons ne sont pas indépendantes les unes des autres, mais à l'inverse, elles se coordonnent entre elles. Cependant aucune étude n'a clairement pu observer et démontrer comment ces multiples interactions se combinent entre elles. Même si on suppose fortement que le comportement d'un piéton à un instant donné est influencé par plus d'un autre unique marcheur, ceci n'a jamais été vérifié. C'est pourquoi l'objectif de l'étude présentée ultérieurement sera de vérifier que dans certaines conditions, il est possible qu'un piéton interagisse simultanément avec d'autres marcheurs et plutôt que de répéter des interactions 1 vs. 1 de façon séquentielle. Mais avant cela, nous allons présenter les outils scientifiques développés dans la littérature et

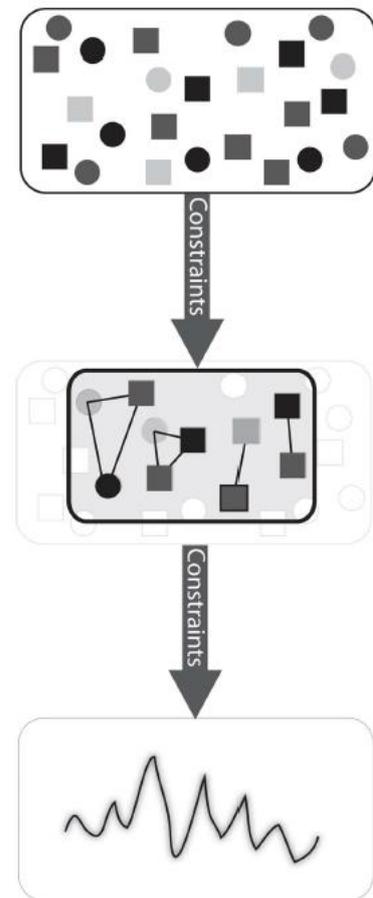


Figure 10 : Représentation schématique de la synergie (Riley et al., 2011)

que nous utiliserons dans notre protocole pour étudier les interactions entre piétons à travers une troisième et ultime partie dans cette revue d'articles.

### Partie III : Outils d'analyse des interactions entre piétons

Dans cette troisième partie nous allons présenter les intérêts et limites de l'oculomètre et de la réalité virtuelle qui sont aujourd'hui fréquemment utilisés dans l'étude des interactions entre l'être humain et son environnement.

#### L'oculomètre

Nous reconnaissons que la perception de l'environnement joue un rôle primordial dans les interactions entre l'homme et son environnement (Patla, 1997). C'est pourquoi plusieurs études utilisent aujourd'hui un oculomètre afin de déceler quel indice visuel a réellement une influence sur le comportement humain. Effectivement, on comprend que dans un environnement encombré comme au sein d'une foule de piétons, même si les interactions sont multiples, il est impossible d'interagir à un moment donné avec tous les marcheurs présents. L'oculomètre permet alors de lever le voile sur les stratégies visuelles de sélections des interactions par un marcheur.



Figure 11 : Oculomètre fixe (à gauche) et portable (à droite) de la compagnie SMI.

Il existe aujourd'hui deux types d'oculomètre : un modèle portable et un modèle fixe (Fig. 11). Le modèle portable est attaché à un casque ou à des lunettes et est relié à une caméra qui enregistre l'environnement face à l'utilisateur. Les travaux utilisant ce dispositif se sont principalement attachés à analyser la distribution du regard de chauffeur de voiture, de cyclistes ou encore de piéton sur les différents éléments présents dans l'environnement (Kowler, 2011 ; Foulsham et al., 2011 ; Mantuano et al., 2016 ; Zeuwts et al., 2016). Mais seulement très peu d'études ont utilisé cet outil pour étudier les interactions entre piétons

(Jovancevic-Misic et Hayhoe, 2009 ; Fotios et al., 2015). Grâce à ces résultats, il semblerait que parmi plusieurs marcheurs à éviter, notre regard se porte sur celui qui représente le plus grand risque de collision (Jovancevic-Misic et Hayhoe, 2009). Et lorsque les marcheurs à éviter arrivent de face, ils sont majoritairement fixés entre 8 et 12m pendant une période entre 300 et 600ms (Fotios et al., 2015). Mais ces travaux n'ont pas cherché à relier les ajustements moteurs occasionnés aux indices visuels fixés.

Le modèle fixe est positionné à côté d'un écran et enregistre la localisation du regard de l'utilisateur sur cet écran. Ce dispositif est utilisé lors d'études dans des environnements contrôlés, c'est-à-dire sur des photos, vidéos ou environnements virtuels (Foulsham et al., 2011, Zeutws et al., 2016 ; Hardiess et al., 2013).

Le modèle portable permet à l'utilisateur d'interagir directement avec un environnement réel ce qui assure un comportement oculaire similaire à celui de la vie quotidienne. Cependant le manque de contrôle sur les facteurs environnants rend difficile l'interprétation des analyses sur la distribution du regard. Il est difficile de savoir si l'activité du regard est réellement influencée par un facteur précis où s'il est seulement dépendant de la situation actuelle dans laquelle se trouve l'utilisateur. La comparaison inter individuelle est délicate car ils ne se retrouvent pas exactement dans la même configuration environnementale.

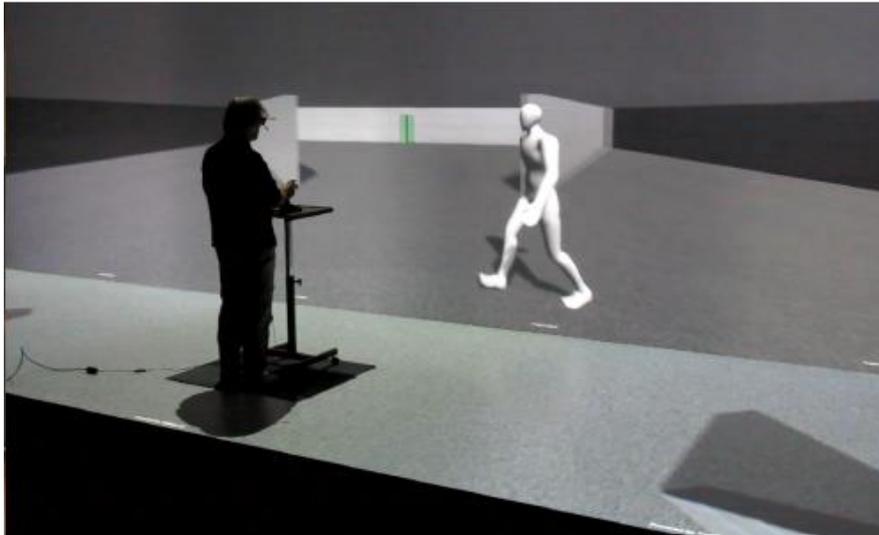
Le modèle fixe est principalement utilisé en laboratoire où le contrôle de l'environnement dans lequel interagir est mieux contrôlé. Certaines limites non négligeables doivent néanmoins être prises en compte. L'activité du regard peut être biaisée par une perte du champ visuel, réduisant le nombre d'indices potentiels à utiliser (Zeutws et al., 2016). Dans l'interprétation des résultats il est important de tenir compte de la taille de l'écran. Il est aussi important de retenir que dans ces études les participants sont assis, et ne reçoivent donc pas d'informations perceptuelles provenant des systèmes vestibulaires et musculaires, ce qui pourrait avoir un effet indésirable sur leur comportement oculaire (Schwarzkopf et al., 2013).

Après avoir succinctement présenté l'utilité et le fonctionnement de l'oculomètre, nous allons maintenant observer les intérêts et limites de l'utilisation des environnements virtuels pour l'étude des interactions entre piétons.

### **L'environnement virtuel**

Aujourd'hui, les designs expérimentaux sur les interactions humaines utilisent régulièrement les environnements virtuels (Fig. 12) (Fink et al., 2007 ; Bideau et al., 2010 ; Hardiess et al.,

2013 ; Olivier et al., sous-presse). Ces designs expérimentaux permettent un contrôle total des éléments présents dans l'environnement. En modulant la présence, l'absence ou le comportement d'un élément, il est ainsi possible de connaître son influence sur le comportement d'un utilisateur. Ceci prend tout son sens dans l'étude des interactions entre humains dans la mesure où de nombreux paramètres sont très difficiles à contrôler en condition réelle, comme réitérer exactement la même trajectoire de marche à la même vitesse.



**Figure 12 : Utilisation d'environnements virtuels pour l'étude des interactions entre piétons (Olivier et al., sous-presse)**

L'environnement virtuel est généré informatiquement et donne à un utilisateur la possibilité de naviguer et d'agir à l'intérieur de celui-ci. On parlera de réalité virtuelle dès lors que l'environnement virtuel est généré en trois dimensions et que les objets avec lesquels on peut interagir ont une forte sensation de présence (Loomis et Blascovich, 1999). Evidemment le sentiment d'être pleinement engagé dans un tel environnement va dépendre du dispositif dans lequel est généré l'environnement. La réalité virtuelle s'applique surtout aux études qui utilisent des systèmes immersifs, comme les casques de réalités virtuels ou encore les CAVES, qui majorent fortement la sensation d'être au sein même de l'environnement (Loomis et Blascovich, 1999).

Les recherches scientifiques ont vérifié la validité écologique d'un tel dispositif pour l'étude des interactions humaines (Loomis et Blascovich, 1999 ; Fink et al., 2007). Effectivement il semblerait que le comportement locomoteur des participants est similaire entre les conditions expérimentales réelles et virtuelles malgré quelques différences ; vitesse moins élevée dans

l'environnement virtuel et distance de croisement plus grande dans l'environnement virtuel (Fink et al., 2007). Il est aussi possible de mettre en place des situations expérimentales mettant en jeu un joystick et une salle immersive qui permettent de reproduire des comportements d'évitement de collision qualitativement proche de ceux de ceux observés en situation réelle entre deux marcheurs (Oliver et al., sous-presse).

L'utilisation d'environnement virtuel semble également opportune à travers des systèmes plus simples que les systèmes immersifs pour l'étude de l'évitement de collision avec un marcheur virtuel (Olivier et al., 2010). En effet des résultats expérimentaux ont montré que les participants étaient aptes à précisément percevoir l'interaction avec un marcheur et ainsi détecter l'ordre de croisement lorsque l'environnement virtuel est généré sur un écran d'ordinateur (Olivier et al., 2010).

Nous avons pu présenter succinctement les outils scientifiques utilisés dans l'étude des interactions humaines comme l'oculomètre et l'environnement virtuel. La combinaison des deux outils nous permettrait d'avoir un avis plus robuste sur les facteurs utilisés par un utilisateur pour adapter son comportement dans une tâche d'évitement de plusieurs marcheurs virtuels. Dans ce mémoire nous nous intéressons exclusivement à l'analyse cinématique. L'analyse de l'activité oculaire sera réalisée ultérieurement.

Nous avons exploré quelques travaux scientifiques sur les interactions entre piétons dans une tâche d'évitement de collision entre deux marcheurs, puis entre plusieurs marcheurs et enfin nous avons présenté les outils technologiques utilisés aujourd'hui pour l'analyse des interactions entre piétons. Nous allons maintenant pouvoir dresser un bilan de cette revue de littérature pour déterminer les objectifs de cette étude.

## Synthèse et objectifs

Tout marcheur évolue dans des environnements plus ou moins encombrés. Chaque élément présent sur sa trajectoire représente un potentiel risque de collision, que celui-ci doit éviter grâce à des ajustements locomoteurs. De fait, la tâche de navigation se complexifie dès lors que le nombre d'obstacles potentiels augmente.

Nous avons vu que, dans une simple interaction entre deux piétons, les adaptations locomotrices ne se produisent que si le risque de collision est suffisamment élevé. Ce risque est évalué en déterminant la distance future de croisement ainsi que le temps restant avant que ce croisement ne se produise. Les adaptations motrices résulteraient d'une stratégie de contrôle de nature anticipatoire, et seraient essentiellement influencées par les caractéristiques situationnelles de l'interaction. Même si l'interaction est résolue de manière mutuelle, la contribution de chaque marcheur va dépendre de leur ordre de passage qui est déterminé relativement tôt dans l'interaction.

Les modèles microscopiques de simulation de foule s'intéressent quant à eux aux différentes interactions locales qui se produisent au sein d'un environnement global. La difficulté est de comprendre comment se combinent les interactions qui se produisent. La théorie d'une synergie interpersonnelle soutient que les marcheurs se coordonnent entre eux de manière implicite pour former une synergie. Mais aucune étude n'est en mesure de présenter concrètement comment se coordonnent les marcheurs entre eux.

Pour étudier les interactions humaines, les études scientifiques utilisent aujourd'hui fréquemment les oculomètres et les environnements virtuels. Les oculomètres permettent d'enregistrer l'activité du regard dans divers environnements et ainsi de déceler avec quel élément l'utilisateur interagit à un moment donné. Les environnements virtuels sont générés pour assurer un contrôle expérimental optimal et tester des hypothèses de travail précis. Ce genre de design permet de s'assurer que tous les participants rencontrent exactement les mêmes situations expérimentales.

Cette revue bibliographique nous a permis de noter un manque de connaissances scientifiques sur les stratégies motrices ainsi que sur les facteurs visuels qu'utilisent d'un piéton pour résoudre de multiples interactions. Pour approfondir ces données, l'étude de Laurentius Meerhoff réalisée l'année dernière en environnement réel, dans un gymnase du laboratoire M2S, a cherché à mettre en avant la faculté d'un piéton à résoudre deux évitements de

collision de façon simultanée. Des difficultés avaient été rencontrées dans la standardisation des situations mesurées. Ce stage de Master 2 vise à poursuivre cette étude en développant une nouvelle expérimentation dans un environnement virtuel afin de contrôler au mieux les paramètres environnementaux.

L'objectif de l'étude est de répondre à la question suivante : « *Lorsque deux interactions se présentent simultanément, est-ce que la trajectoire de marche résulte d'interactions successives ou d'interactions simultanées avec les autres marcheurs ?* »

Nous émettons l'idée que sous certaines conditions, il est possible d'observer des situations d'interactions simultanées. Ainsi pour observer une interaction simultanée nous chercherons à vérifier deux hypothèses lors d'une interaction 1 vs 2 marcheurs :

- H1 : Le marcheur préfère changer l'ordre de croisement avec le premier marcheur avec lequel il interagit en raison de la présence d'un second marcheur à éviter
- H2 : Le comportement d'un marcheur est bien dépendant des deux marcheurs à éviter et non pas seulement du deuxième à éviter

Pour vérifier ces différentes hypothèses, nous avons mis en place une expérimentation en milieu virtuel qui permet à un participant d'interagir potentiellement avec un ou deux avatars, représentant des marcheurs virtuels. Nous allons détailler maintenant l'ensemble du protocole développé en collaboration entre les équipes MimeTIC et Lagadic de l'Inria.

# Méthodologie générale

## Présentation de l'expérimentation

### Participants

18 participants (14 hommes et 4 femmes), âgés en moyenne de 23 ans ( $\pm 1,6$  ans) ont participé à cette étude. Seuls les volontaires sans problème visuel nécessitant le port de lunettes ont pu participer à l'expérimentation. En effet, de par l'utilisation de l'oculomètre dans le cadre plus général du projet, le port de lunettes de vue était un critère d'exclusion car il perturbait la mesure de l'activité oculaire.

### Equipements

L'expérience se déroule sur un ordinateur de bureau (Dell Precision T3600) avec un écran de 24 pouces (1920\*1200 pixels, Dell 2408WFP) positionné à 50 cm du sujet. Les sujets peuvent se déplacer dans un environnement virtuel grâce à un joystick (Logitech X3D) leur permettant d'accélérer ou de ralentir ainsi que de pivoter à gauche ou à droite (Fig. 13). Si aucune action n'est effectuée sur ce joystick, le participant avance droit devant lui à une vitesse constante d'1,33 m/s dans l'environnement virtuel. Cette vitesse correspond à une vitesse de confort classique de marche (Levine et al., 2012).

L'activité oculaire est enregistrée grâce à « l'Eye Tribe Tracker » de la compagnie Eye Tribe © avec une fréquence d'acquisition de 60Hz et une erreur de mesure de 0,5 à 1,0°. L'oculomètre est positionné sous l'écran (Fig. 13) et est relié à l'ordinateur pour coupler l'orientation du regard à l'élément fixé sur l'écran. Le participant est positionné sur un fauteuil réglable pour assurer le plus grand confort de façon à maintenir sa tête dans une position stable pour que l'enregistrement de l'activité oculaire soit de bonne qualité.

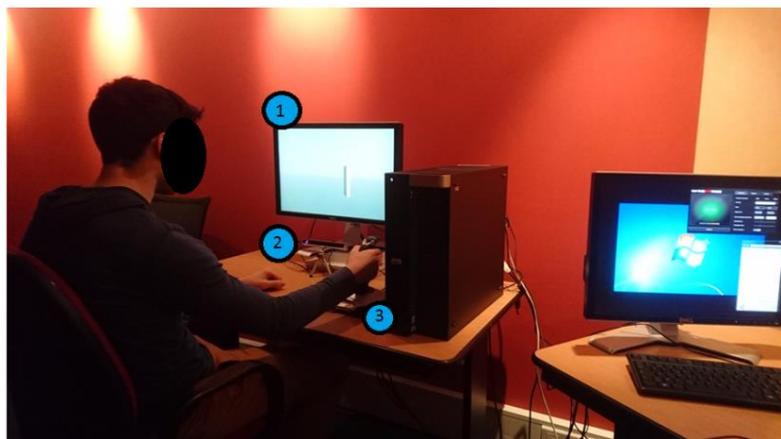


Figure 13 : Installation de l'expérience. 1) Ecran sur lequel se déroule l'expérimentation. 2) Oculomètre. 3) Joystick à main

## Consignes aux participants

L'environnement virtuel est généré à partir du logiciel Unity (Fig. 14). La configuration des différentes conditions expérimentales est réalisée grâce au logiciel Matlab. La programmation informatique est réalisée par Laurentius Meerhoff, qui s'est inspiré des travaux réalisés par Julien Bruneau anciennement doctorant de l'INRIA.

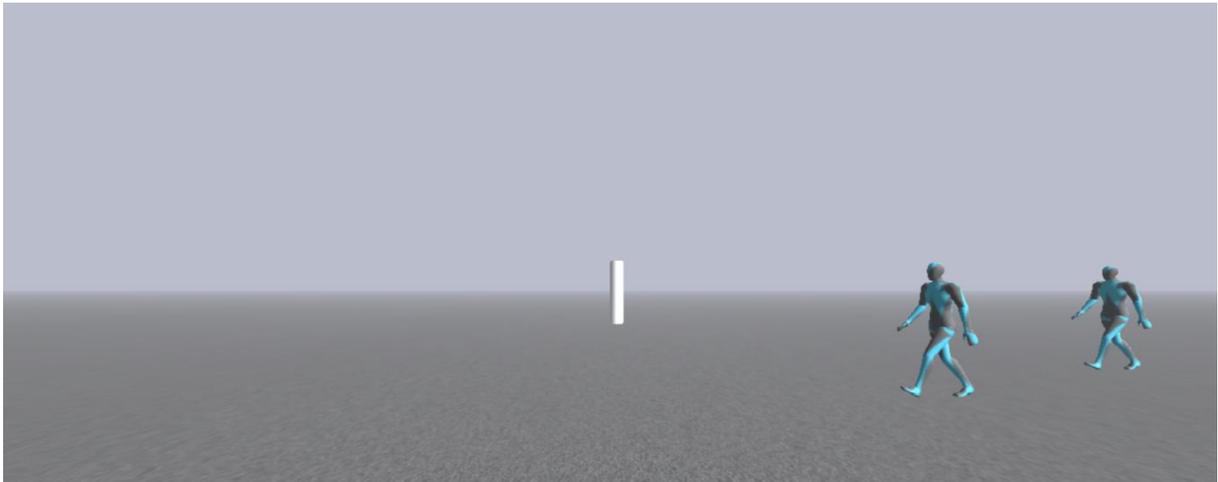


Figure 14 : Capture d'écran de l'environnement virtuel diffusé sur l'écran

L'objectif pour chaque participant est de rejoindre une cible, représentée par un cylindre, sans rentrer en collision avec les marcheurs virtuels présents dans la scène (Fig. 14). Il leur est spécifié de n'utiliser le joystick que si et seulement ils pensaient qu'une collision pourrait se produire avec l'un des marcheurs. Il leur est également précisé que le but n'est pas de rejoindre la cible le plus rapidement possible.

Les marcheurs virtuels se déplacent à vitesse constante dans une direction perpendiculaire à la direction initiale du participant (Fig. 14). Ils sont passifs, c'est-à-dire qu'ils ne réagissent pas au comportement des participants. En fonction des conditions, il peut y avoir un ou deux marcheurs présents dans la scène. Certains facteurs comme la forme, la couleur ou encore le contraste peuvent influencer l'attraction du regard. Donc les avatars sont physiquement indifférenciés pour ne pas biaiser la répartition des fixations visuelles.

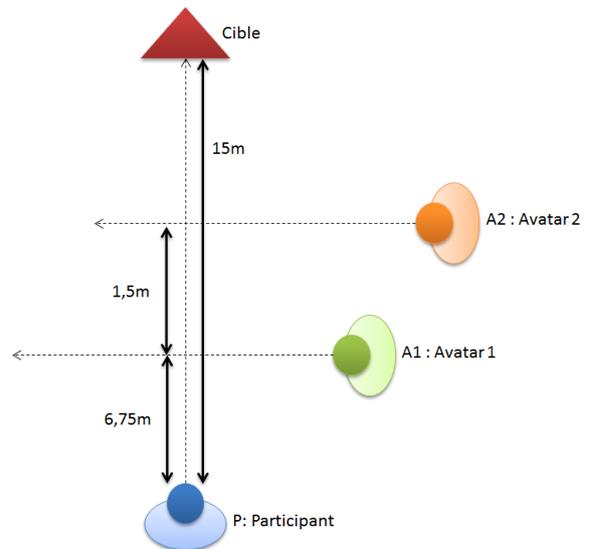
## Configuration expérimentale

### Paramètres généraux

La cible à rejoindre est positionnée à 15,00m de la position initiale du sujet (Fig. 15). La distance 15,00m est une valeur arbitraire que nous supposons suffisamment courte pour

inciter le participant à réajuster sa trajectoire après avoir évité A2 et suffisamment longue pour lui laisser le temps de finir sa manœuvre d'évitement de façon fluide comme nous l'avons vu dans la revue de littérature.

Figure 15 Vue d'oiseau de la configuration expérimentale. Les flèches en pointillé représentent les trajectoires du participant, du premier avatar à éviter (A1) et du second avatar à éviter (A2) si aucune adaptation de trajectoire n'est produite.



Un ou deux avatars à éviter peuvent être présents dans la scène en fonction de la condition expérimentale. Une distance de 6,75m sépare la position initiale du sujet au point de croisement simulé avec A1 si aucune adaptation motrice n'est réalisée (Fig. 15). La valeur de 6,75m est également une distance arbitraire que nous supposons suffisamment longue pour que le participant puisse clairement observer la configuration de l'environnement. Quand A2 est présent, il est positionné 1,50 m plus loin que A1 sur l'axe longitudinal. Nous supposons que cette distance est suffisamment courte pour que A2 puisse représenter un danger imminent avec le participant après avoir évité A1, et qu'elle est suffisamment longue pour laisser au moins un cycle de marche nécessaire à l'initiation des adaptations motrices (Patla, 1997), ce qui donne la possibilité au participant de passer avant ou après A2.

### Stimuli et conditions expérimentales

Pour pouvoir mettre en évidence une interaction simultanée, nous voulons observer une inversion de l'ordre de croisement entre le participant et A1. Pour cela nous avons configuré la condition expérimentale HR (*High Risk*).

Dans la condition HR (Fig. 16), A1 et A2 sont présents dans l'environnement. A1 est initialement positionné de façon à être en retard ou en avance dans l'interaction avec le participant, ce qui pré définit un ordre de croisement. A2 est positionné de façon à représenter un risque de collision pour le participant si celui-ci préserve l'ordre de croisement pré défini avec A1.

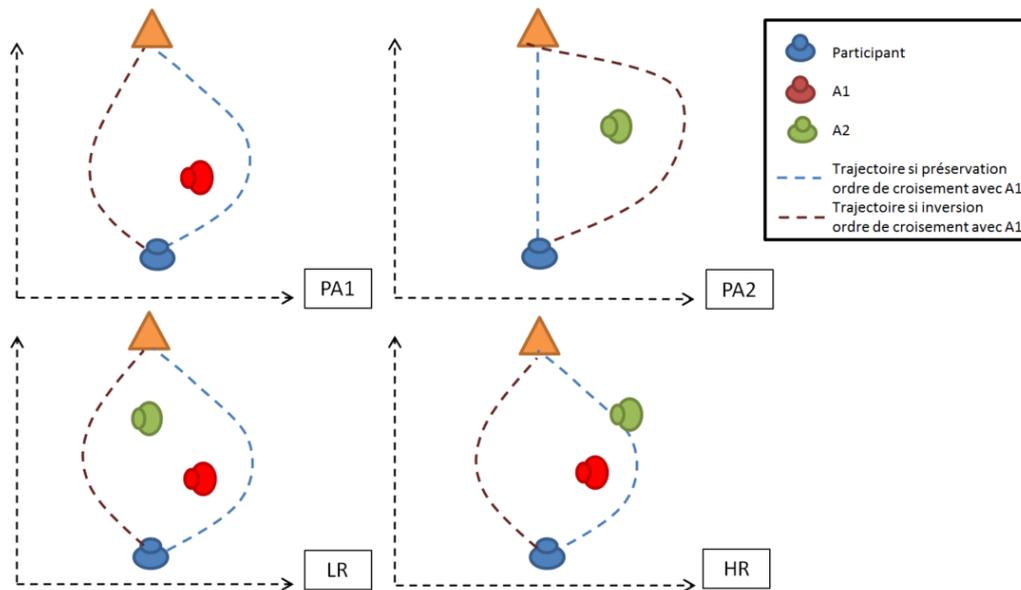


Figure 16 : La condition expérimentale HR et les trois conditions contrôles PA1, PA2 et LR. Triangle jaune : cible. Ronds bleus : participant, Ronds rouges : A1, Ronds verts : A2. Tirets bleus : trajectoire si préservation ordre de croisement avec A1, ou avec A2 dans condition PA2. Tirets marrons : trajectoire si inversion des ordres de croisement avec A1 ou avec A2 pour la condition PA2

Pour vérifier notre première hypothèse, nous avons mis en place une condition contrôle, PA1 (*Pairwise A1*), où seul A1 est présent dans l'environnement (Fig. 16). Il est positionné de la même façon que la condition HR, c'est-à-dire de façon à inciter le même ordre de croisement que dans HR, et donc suivre la trajectoire en bleu sur la figure 16. Grâce à cette condition contrôle, nous pourrions observer si le nombre d'inversion de l'ordre de croisement avec A1 est supérieur dans la condition HR que lorsque le participant n'interagit qu'avec A1. Autrement dit, nous souhaitons observer plus de trajectoires marron dans la condition HR que dans la condition PA1 pour vérifier notre première hypothèse (Fig. 16).

Pour vérifier notre seconde hypothèse, nous avons mis en place une seconde condition contrôle, PA2 (*Pairwise A2*), où seul A2 est présent dans l'environnement (Fig. 16). Il est positionné de la même façon que la condition HR. Grâce à cette condition contrôle, nous pourrions vérifier si le participant adapte sa trajectoire en fonction de A1 et A2 ou de seulement A2. Nous souhaitons observer ici différentes façons d'interagir avec A2, en terme de vitesse d'approche et de distance de croisement, entre la condition HR et PA2 pour vérifier notre seconde hypothèse.

Pour apporter un peu de variabilité dans le protocole expérimental, et ainsi limiter l'effet de l'apprentissage, nous avons également mis en place la condition LR (*Low Risk*). Ici les deux

avatars sont présents dans l'environnement (Fig. 16). A1 est positionné de la même façon que dans la condition HR. A2 est positionné cette fois de façon à ne pas représenter un risque de collision pour le participant s'il préserve l'ordre de croisement pré défini avec A1.

### **Autres paramètres expérimentaux**

Pour les quatre conditions, nous avons défini différentes configurations des marcheurs dans l'environnement. Les marcheurs pouvaient provenir soit de la gauche ou de la droite par rapport au sujet.

Nous avons modulé l'ordre de croisement initial avec A1. L'ordre de croisement est déterminé en fonction de la position initiale d'A1 qui définit une MPD initiale. Une MPD initiale positive signifie que le participant est supposé passer en premier et, à l'inverse, une MPD initiale négative signifie qu'il est supposé passer en second.

La confiance que l'on peut avoir dans la prédiction de l'ordre de croisement augmente avec la valeur absolue de MPD (Knorr et al., 2016). De ce fait, pour chaque ordre de croisement pré défini avec A1, nous avons déterminé trois valeurs absolues de MPD initiales, soit six valeurs de MPD au total : -0,8, -0,5, -0,2, 0,2, 0,5 et 0,8m.

Pour résumer, pour chacune des quatre conditions de marcheurs, il y avait deux ordres de croisement initiaux, trois valeurs de MPD initiales et pour des marcheurs virtuels provenant de gauche et de droite. Chaque participant a répété deux fois l'ensemble de ces configurations ce qui l'a mené à réaliser 96 essais dans un ordre aléatoire.

### **Déroulement**

Dans un premier temps, chaque participant doit lire et signer notre formulaire de consentement, expliquant le déroulement de l'expérimentation et les données mesurées, attestant leur anonymat et demander leur accord de droit d'image.

Avant de démarrer l'expérimentation, une étape de calibration de l'oculomètre est nécessaire. Une fois celle-ci réalisée, nous demandons aux participants de maintenir cette position tout au long de l'expérimentation de façon à garder un enregistrement des données oculométriques de bonne qualité.

Les quatre premiers passages de l'expérimentation permettent au participant de se familiariser avec l'utilisation du joystick et l'environnement virtuel. Le participant procède ensuite aux 96 passages dans un ordre aléatoire.

Afin de limiter la monotonie, deux pauses s'offrent à lui après le 32<sup>e</sup> et le 64<sup>e</sup> passage. Il est également possible de demander une pause supplémentaire si besoin. Le participant procède ensuite à un dernier passage pour valider la qualité de l'enregistrement oculaire. Dans ce passage il doit simplement fixer les avatars qui deviennent rouges ou la cible lorsqu'aucun avatar rouge n'est présent dans la scène.

## Analyses des données

### Variables mesurées

Les données brutes relatant la trajectoire des participants et des avatars dans l'environnement virtuel sont enregistrées dans des feuilles de calcul Excel. Elles sont ensuite rangées et traitées grâce au logiciel Matlab.

Pour rappel, nous nous intéressons ici seulement à l'analyse des trajectoires des participants. A partir des trajectoires obtenues des participants, A1 et A2, nous chercherons à observer pour répondre à nos hypothèses :

- Le **nombre de collisions**. Au regard de la littérature, nous déterminons qu'une collision se produit dès lors que la distance entre le centre de masse du participant et celle d'un des marcheurs virtuels est inférieure à 0,40m (Knorr et al., 2016).
- Le **nombre d'inversions** de l'ordre de croisement pré défini entre le participant et A1
- Le **profil de vitesse** des participants
- La **distance de croisement** avec les avatars

### Analyse Statistique

Nous utilisons le logiciel SigmaStat pour notre analyse statistique. Pour comparer le nombre de collisions et le nombre d'inversion d'ordre de croisement entre les conditions de marcheurs, nous réalisons un test de Mc Nemar qui compare deux échantillons appariés pour des valeurs binomiales. Pour évaluer la normalité des distributions de chaque échantillon, nous utilisons le test de Kolmogorov Smirnov. Pour observer un effet de la condition de marcheurs sur les vitesses de moyennes de déplacement nous réalisons une ANOVA à une voie à mesure répétée sur les rangs grâce au test de Friedman. Pour déterminer où se situent les différences entre les conditions, nous utilisons le test post-hoc de Student Newman Keul. Pour comparer deux distances de croisement moyennes avec A1 entre les conditions de marcheurs PA1 et HR, puis avec A2 entre les conditions PA2 et HR, nous utilisons le test de Student apparié.

# Résultats

## Nombre de collisions

L'une des consignes de la tâche à réaliser pour les participants était d'éviter toutes collisions avec les marcheurs virtuels. Nous avons donc évalué le nombre de collisions et donc de passages non réussis par les participants.

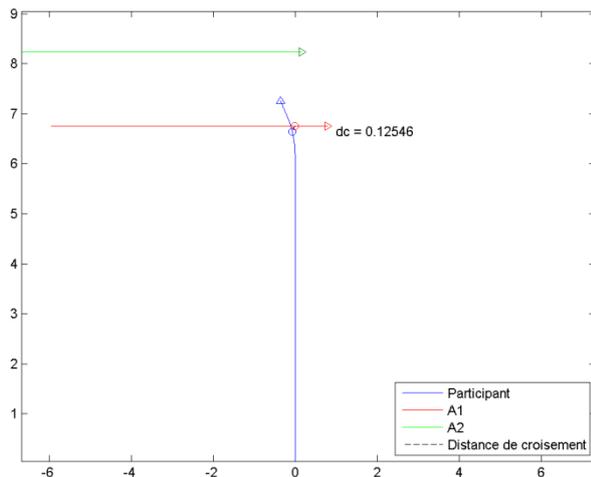


Figure 17 : Essai échoué, avec une collision avec l'un des marcheurs virtuels, dans la condition HR. La distance de croisement ( $dc = 0,12546$  m) est inférieure à  $0,40$ m.

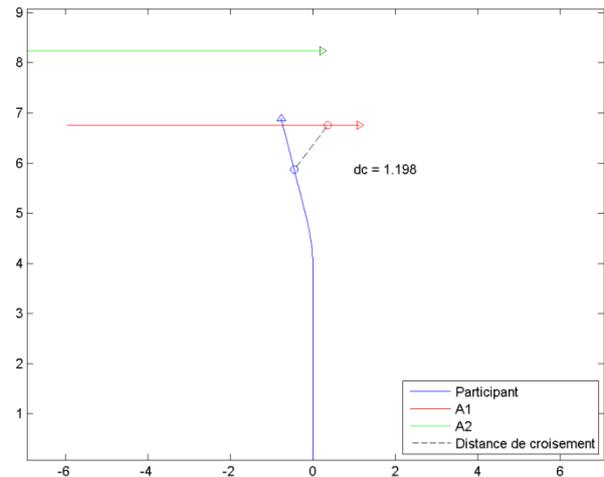


Figure 18 : Essai réussi, sans collision avec l'un des marcheurs virtuels, dans la condition HR. La distance de croisement ( $dc = 1,198$ m) est supérieure à  $0,40$ m.

Afin de comparer HR et PA1, nous classons les passages par configuration environnementale, c'est-à-dire en fonction de l'ordre de croisement pré défini avec A1 (+ : le participant est supposé passé en premier / - : le participant est supposé passé en second), de la MPD initiale (0,2 / 0,5 / 0,8), du côté d'interaction (gauche / droite), et de la répétition (1 / 2). Ainsi pour chaque configuration environnementale, nous reportons la présence d'une collision (Fig. 17) ou non (Fig. 18) dans les conditions PA1 et HR (voir Annexe).

Ensuite nous reportons dans un tableau de contingence que 3 collisions se sont produites dans les deux conditions, 9 uniquement dans la condition PA1, 60 uniquement dans la condition HR et nous reportons 360 comparaisons où aucune collision n'est observée dans aucune des deux conditions pour la même configuration environnementale (tableau 1). Etant donné que nous avons 432 passages par condition, nous pouvons observer 432 comparaisons entre les conditions PA1 et HR.

n = 432		HR	
		Collision	Pas de collision
PA1	Collision	3	9
	Pas de collision	60	360

Tableau 1 : Tableau de contingence du nombre de collisions par condition (PA1 et HR)

Au total, nous observons une collision avec A1 dans 2,8% des essais de la condition PA1 et avec l'un des marcheurs, A1 ou A2, dans 14,6 % des essais de la condition HR. Nous n'observons aucune collision dans la condition PA2.

**Grâce au test de McNemar, nous observons qu'il y a significativement plus de collisions dans la condition HR que dans la condition PA1 ( $\chi^2(1) = 36,232$  ;  $p \leq 0.001$ ).**

### Nombre d'inversions de l'ordre de croisement entre les participants et A1

Les figures 19 et 20 montrent un exemple de deux trajectoires observées pour la même configuration environnementale dans la condition HR (Fig. 19) et dans la condition PA1 (Fig. 20). Dans les deux conditions, l'ordre de croisement prédéfini était A1 passe en premier et le participant en second. La trajectoire bleue correspond à une adaptation qui conduit à une inversion de l'ordre de croisement initial, tandis que la trajectoire cyan représente une adaptation qui a préservé l'ordre de croisement initial.

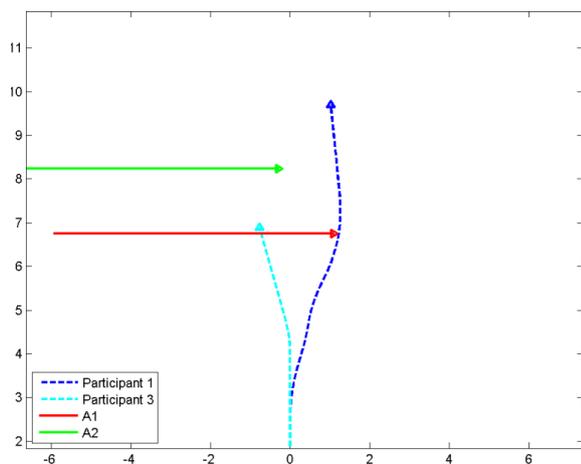


Figure 19 : Condition HR. Trajectoire avec préservation de l'ordre de croisement (cyan) et trajectoire avec inversion de l'ordre de croisement (bleue) pour la même configuration environnementale

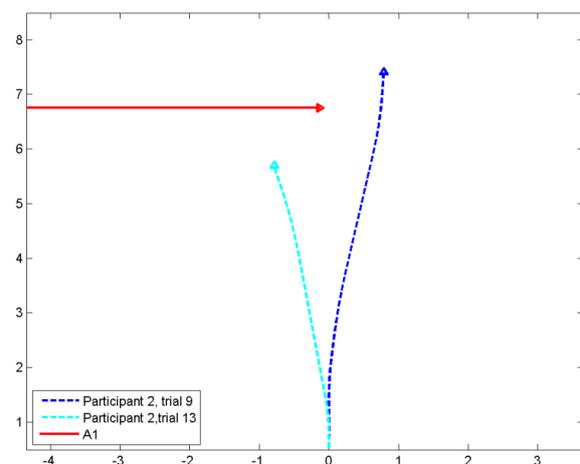


Figure 20 : Condition PA1. Trajectoire avec préservation de l'ordre de croisement (cyan) et trajectoire avec inversion de l'ordre de croisement (bleue) pour la même configuration environnementale

A l'image de la comparaison du nombre de collisions, pour chaque configuration environnementale nous reportons l'observation d'une inversion (trajectoires bleues sur les figures 19 et 20) ou d'une préservation (trajectoires cyans sur les figures 19 et 20) de l'ordre de croisement avec A1.

Nous reportons ensuite dans un tableau de contingence le nombre de fois où les participants ont changé l'ordre de croisement pré défini dans les deux conditions HR et PA1 (60 observations), seulement dans la condition HR (118 observations), seulement dans la condition PA1 (33 observations) et le nombre de fois où aucune inversion n'a été constatée dans les deux conditions (221 observations) pour la même configuration environnementale (tableau 2).

**Tableau 2 : Tableau de contingence du nombre d'inversion par condition (PA1 et HR)**

n = 432		HR	
		Inversion	Pas d'inversion
PA1	Inversion	60	33
	Pas d'inversion	118	221

**Grâce au test de Mc Nemar, nous observons qu'il y a significativement plus d'inversions de l'ordre de croisement entre les participants et A1 dans la condition HR que dans la condition PA1 ( $\chi^2(1) = 46,728$  ;  $p \leq 0.001$ ).**

### Interaction entre inversion et collision

Nous reportons dans le tableau 3 le nombre de collisions qui se sont produites lorsque les participants ont voulu changer l'ordre de croisement avec A1, pour les conditions PA1 et HR.

**Tableau 3 Nombre de collisions en fonction de la présence d'inversion de l'ordre de croisement avec A1 pour les conditions PA1 et HR**

	Inversion		Pas d'inversion		Total
	Collision	Pas de collision	Collision	Pas de Collision	
PA1	10	83	2	337	432
HR	0	178	63	191	432

Sans avoir pu trouver de tests statistiques permettant de comparer l'interaction de deux facteurs (condition et inversion) sur une variable binomiale pour échantillons appariés, nous pouvons tout de même noter :

- Pour PA1 : le nombre de collision est supérieur quand les participants ont voulu changer l'ordre de croisement pré défini avec A1. Nous observons 10 collisions sur 93 passages lorsque les participants ont voulu changer l'ordre de croisement contre 2 collisions sur 337 passages lorsqu'ils ont voulu préserver l'ordre de croisement avec A1.
- Pour HR : le nombre de collision est supérieur quand les participants ont voulu préserver l'ordre de croisement pré défini avec A1. Nous n'observons aucune collision sur 178 passages avec une inversion de l'ordre de croisement tandis que nous observons 63 collisions sur 254 essais avec une préservation de l'ordre de croisement avec A1.

Nous allons maintenant nous intéresser aux paramètres cinématiques de l'évitement de collision à savoir les profils de vitesse et les distances de croisement avec les marcheurs virtuels entre les différentes conditions.

Avant de présenter les résultats, notons que nous avons exclu de l'analyse tous les essais qui présentaient une collision, soit 12 dans la condition PA1, 63 dans la condition HR et 0 dans la condition PA2. Nous excluons également les essais pour lesquels nous avons pu constater a posteriori une configuration environnementale incorrecte, c'est-à-dire que l'essai généré dans Unity n'était pas conforme à l'essai attendu. Nous n'avons pas d'explication probante à l'heure actuelle pour expliquer ceci. Par exemple, certains essais qui étaient supposés avoir une MPD avec A1 (ou avec A2) initiale négative et qui, sans raison apparente, ont finalement une MPD initiale positive, soit 21 dans la condition PA1, 16 dans la condition HR et 1 dans la condition PA2. Au final, nous comparons 399 passages de la condition PA1, 417 passages de la condition PA1, 353 passages de la condition HR et 431 passages de la condition PA2.

De ce fait, pour la suite de l'analyse, nous avons moyenné pour chaque participant (18 participants) leur vitesse moyenne au cours de l'interaction dans chaque condition ainsi que leur distance de croisement avec A1 et A2.

## Profils de vitesse

Ici nous normalisons le temps de chaque essai par la durée d'interaction avec le dernier marcheur virtuel à éviter, et non pas par le temps total de l'essai. Le 0% correspond au début de l'essai et le 100% à l'instant du croisement avec A1 dans la condition PA1 ou avec A2 dans les conditions HR et PA2.

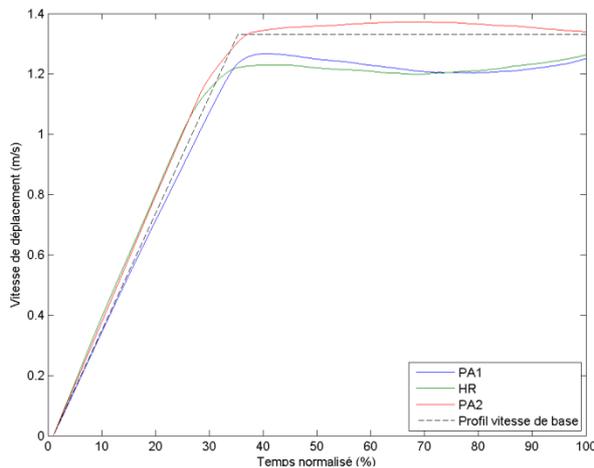


Figure 21 : Evolution de la vitesse moyenne de marche de tous les participants dans les conditions HR, PA1 et PA2. La courbe en pointillés noirs correspond à la vitesse de déplacement si aucune accélération ou décélération n'est produite

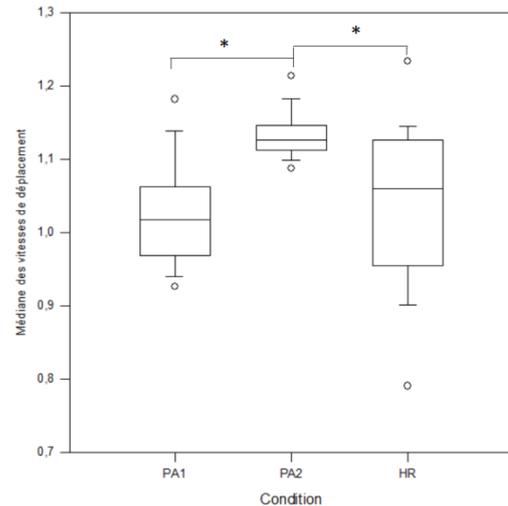


Figure 22 : Vitesses de déplacement (m/s) des participants par condition. On note une différence significative (\*) entre la vitesse de la condition PA2 par rapport aux conditions HR et PA1 ( $p < 0,05$ ).

Nous pouvons observer avec la figure 21 l'évolution des vitesses de marche moyennes de tous les essais valides au cours de l'interaction dans les conditions HR, PA1 et PA2. D'un point de vue graphique, il semblerait que les participants se soient déplacés plus rapidement dans la condition PA2 (courbe rouge) que dans les conditions HR (courbe verte) et PA1 (courbe bleue) (Fig. 21).

Nous comparons ensuite les vitesses moyennes de déplacement des participants dans les conditions PA1, PA2 et HR (Fig. 22). Tous les échantillons n'ayant pas une distribution normale, nous avons réalisé un test de Friedman qui nous montre que les participants se sont déplacés à différentes vitesses entre les conditions HR, PA1 et PA2 ( $\chi^2(2) = 16,333$ ;  $p \leq 0,001$ ).

**Le test post-hoc Student-Newman-Keuls nous montre que la vitesse moyenne de déplacement dans la condition PA2 (1,13 m/s) est significativement supérieure à celle dans HR (1,06 m/s) qui est elle-même significativement supérieure à celle dans PA1 (1,02 m/s) ( $p < 0,05$ ).**

## Distances de croisement

Nous souhaitons observer la présence d'un effet de la condition sur la distance de croisement avec A1 entre les conditions PA1 et HR puis avec A2 entre les conditions PA2 et HR (Fig. 23). Nous n'observons pas de différence significative sur la distance de croisement avec A1 entre les conditions A1 (1,21m ;  $\pm$  0,24) et HR (1,29m ;  $\pm$  0,33).

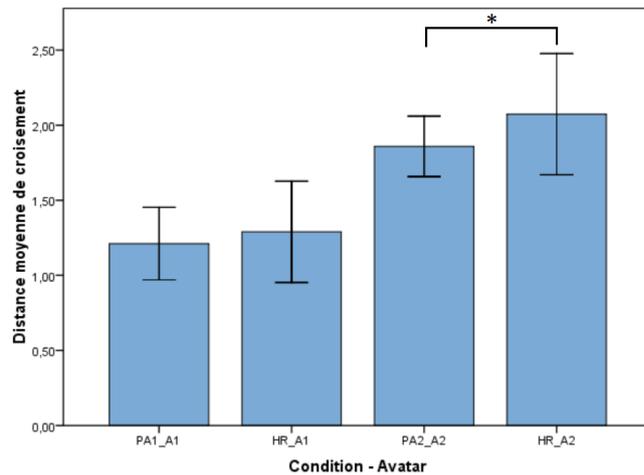


Figure 23 : Distance moyenne de croisement (m) avec A1 et A2 en fonction de la condition : PA1, HR ou PA2. On observe une différence significative (\*) entre les distances de croisement avec A2 des conditions HR et PA2 ( $p < 0,05$ )

Le résultat du test de Student nous montre que la distance de croisement avec A2 est significativement supérieure dans la condition HR (2,01m ;  $\pm$  0,40) que dans la condition PA2 (1,86m ;  $\pm$  0,20) ( $t(17) = -2,807$ ,  $p = 0,012$ ).

## Discussion

L'objectif de notre étude était de comprendre l'organisation temporelle qu'un marcheur met en place pour traiter de multiples interactions. Plus précisément, nous souhaitons savoir si ce marcheur interagit simultanément ou séquentiellement avec les autres marcheurs pour résoudre une tâche d'évitement de collision à 1 vs. 2 marcheurs (A1 et A2). Nous avons développé une étude en réalité virtuelle qui s'intéresse au comportement d'un participant dans 4 conditions d'interactions principales :

- HR (*High Risk*) : A1 et A2 sont présents dans l'environnement virtuel. A1 est initialement positionné de façon à pré définir un ordre de croisement avec le participant. A2 est positionné de façon à représenter un fort risque de collision pour le participant si celui préserve l'ordre de croisement pré défini avec A1.
- PA1 (*Pairwise A1*) : Seul A1 est présent dans l'environnement. Il est initialement positionné de la même façon que dans la condition HR.
- PA2 (*Pairwise A2*) : Seul A2 est présent dans l'environnement. Il est initialement positionné de la même façon que dans la condition HR.
- LR (*Low Risk*) : A1 et A2 sont présents dans l'environnement. A1 est initialement positionné de la même façon que dans la condition HR. A2 est initialement positionné cette fois de façon à ne pas représenter un risque de collision pour le participant si celui-ci préserve l'ordre de croisement pré défini avec A1

Nous faisons l'hypothèse que dans certaines conditions le marcheur étudié procède à un traitement simultané de l'interaction. Les deux sous hypothèses de travail qui témoignent d'une interaction simultanée sont les suivantes :

- H1 : L'ordre de croisement avec le premier marcheur avec lequel le marcheur étudié interagit est modifié en raison de la présence d'un second marcheur à éviter
- H2 : La cinématique de la trajectoire du marcheur étudié est dépendante des deux marcheurs à éviter et non pas seulement du deuxième à éviter

### Hypothèse 1

Nous supposons que lors d'interactions multiples entre marcheurs, les adaptations motrices d'un marcheur ne répondent pas à une seule interaction à la fois mais bien à plusieurs simultanément. Les comportements observés devraient ainsi différer d'une interaction classique à 1 vs. 1 bien documenté dans la littérature.

## Collisions

Les données statistiques nous ont permis d'observer un effet de la condition sur le nombre de collisions.

Dans la condition PA1, nous avons observé un nombre de collisions relativement élevé (12 collisions). En conditions réelles, rares sont les collisions répertoriées (Knorr et al., 2016 ; Olivier et al., 2012). Ce nombre peut être expliqué par l'utilisation de l'environnement virtuel. En effet, les travaux d'Olivier et al. (2010) ont relevé une diminution de la précision à percevoir le risque de collision avec un marcheur virtuel avec un tel design expérimental en raison d'une modification de la perception des distances en environnement virtuel.

Ce dernier point peut expliquer une partie des collisions également dans la condition HR. Mais le nombre de collisions, 5 fois supérieur (63) à celui de la condition PA1 (12), ne peut alors être uniquement expliqué par l'utilisation de l'environnement virtuel. De façon logique, la présence d'un second marcheur augmente le nombre d'obstacles avec lesquels il est possible de rentrer en collision. Mais notons que 58 des 63 collisions se sont produites avec A1. Ceci suggère que résoudre la première interaction est une étape clef dans la réussite de la tâche demandée aux participants et que cette étape est grandement complexifiée par la présence simultanée d'un second marcheur (A2 dans la condition HR).

La réussite de la tâche va dépendre des choix de trajectoires effectués par les participants. Nous allons donc nous intéresser à l'inversion ou non de l'ordre de croisement avec A1 par les participants.

## Inversion de l'ordre de croisement

Le résultat principal de cette étude est le nombre d'inversions significativement supérieur dans la condition HR par rapport à la condition PA1. Le seul facteur ayant changé entre les deux conditions est la présence d'A2 sur la trajectoire du participant si celui-ci décidait de préserver l'ordre de croisement avec A1. Nous pouvons alors suggérer que c'est bien la présence d'A2 qui a augmenté le nombre d'inversions de l'ordre de croisement avec A1. Ceci nous permet donc de dire que les participants ont pu interagir de manière simultanée avec les deux marcheurs virtuels. Cependant cette interprétation doit être nuancée.

En effet nous espérons un nombre d'inversions des ordres de croisement dans la condition PA1 plus faible que celui obtenu (93 inversions). Nous avons observé une inversion de l'ordre de croisement avec A1 dans environ 21,5% des passages, ce qui est largement supérieur aux

résultats de Knorr et al. (2016) qui ont observé seulement 7% d'inversion de l'ordre de croisement en condition réelle. Ceci pourrait être expliqué par les faibles valeurs de MPD que nous avons incorporées dans la configuration environnementale. En effet, dans plus de la moitié des passages présentant une inversion de l'ordre de croisement (54 sur 93 passages), la valeur de MPD initiale d'A1 était de 0,2m. Or l'ordre de passage devient plus difficile à percevoir dans les environnements virtuels pour des valeurs de MPD proche de 0,0 m (Olivier et al., sous-presse).

Ce même biais peut être néanmoins déclaré pour la condition HR, c'est pourquoi nous nous intéressons à la différence du nombre d'inversions entre PA1 et HR pour affirmer que c'est bien la présence du second marcheur (A2) qui influence la mise en place d'un traitement simultané des interactions dans la condition HR.

Même si les tests statistiques nous permettent d'établir que le nombre d'inversion est différent entre les conditions PA1 et HR, nous n'avons observé que 178 inversions d'ordre de croisement sur 432 passages, soit 41,2%. Nous espérons une valeur plus importante, car si nous nous basons uniquement sur l'inversion de l'ordre de croisement comme critère d'observation d'un traitement simultané, nous pouvons considérer que plus de la moitié des passages de la condition HR sont réalisés via un traitement séquentiel des interactions.

Notre protocole repose sur une seule façon de décrire une interaction simultanée. Nous avons vu que lors d'une interaction entre deux marcheurs, le comportement respectif de chacun dépend de leur ordre de passage (Olivier et al., 2013). Cet ordre de passage s'avère être prématurément déterminé dans l'interaction et préservé jusqu'au croisement (Olivier et al., 2013 ; Knorr et al., 2016). Sans équivoque, une inversion de l'ordre de croisement suggère un traitement simultané de multiples interactions. Or, ceci n'est potentiellement pas le seul critère pour pouvoir décrire un traitement simultané de plusieurs interactions. En effet il est également possible d'interagir de manière simultanée avec deux marcheurs sans pour autant changer l'ordre de croisement avec le premier marcheur à éviter, mais ces critères seront sûrement plus discutables.

### **Interaction entre inversion et collision**

Nous observons dans la condition PA1, que le nombre de collisions est supérieur lors des trajectoires avec une inversion de l'ordre de croisement (10 collisions) comparé aux trajectoires sans inversion (2 collisions). Ce qui suggère qu'il est plus risqué de changer l'ordre de croisement dans une interaction entre deux marcheurs. Ceci soutient le fait de

préserver l'ordre de croisement initial dans une interaction avec un seul marcheur (Knorr et al., 2016 ; Olivier et al., 2013).

Nous observons à l'inverse, dans la condition HR, que les 63 collisions se sont produites seulement lorsque les participants ont préservé l'ordre initial de croisement avec A1. Ce qui suggère qu'un traitement simultané des interactions faciliterait la réalisation de la tâche en diminuant le risque de collision avec les marcheurs virtuels.

Ces données sont en faveur de la configuration de notre expérimentation. En effet dans la condition PA1, changer l'ordre de croisement augmente le risque d'échouer la tâche demandée. Pour la condition HR, nous souhaitons rendre défavorable la trajectoire induite pas une préservation de l'ordre de croisement avec A1 grâce à la présence d'A2. Ces données sur la répartition des collisions en fonction du choix de trajectoire montrent bien que le placement d'A2 a perturbé le comportement des participants, et que la solution offrant la plus faible probabilité de collision était d'invertir l'ordre de croisement avec A1.

Grâce à ces résultats, nous pouvons valider notre première hypothèse H1. Mais notons que le traitement simultané des interactions n'est pas observé de manière générique car seulement 41,2 % des passages ont été résolus via cette stratégie. Pour supporter cette conclusion, nous devons nous assurer que le comportement des participants dans la condition HR n'est pas uniquement dépendant de la présence d'A2 mais bien des deux marcheurs virtuels, A1 et A2.

## **Hypothèse 2**

Il existe différentes façons de comparer la cinématique de plusieurs trajectoires. Pour comparer les trajectoires entre nos conditions, notre analyse est basée sur la comparaison de la vitesse moyenne de déplacement et la distance de croisement avec les marcheurs virtuels. Nous avons donc calculé pour tous les sujets, leur vitesse moyenne de déplacement au cours de l'interaction dans les conditions PA1, PA2 et HR, ainsi que leur distance moyenne de croisement avec A1 dans les conditions PA1 et HR et enfin leur distance moyenne de croisement avec A2 dans les conditions PA2 et HR.

### **Vitesse de déplacement**

Nous avons pu relever que la vitesse moyenne de déplacement des participants est supérieure dans la condition PA2 par rapport à celle relevée dans les conditions PA1 et HR. Ceci suggère qu'A1 a influencé le comportement des participants dans la condition HR.

Pour expliquer les différences dans les vitesses moyennes, rappelons que dans la condition PA2, seul A2 est présent dans l'environnement et qu'il est placé de la même façon que dans la condition HR. Dans cette condition PA2, A2 ne représente pas un fort risque de collision initialement pour le participant, il n'a donc pas besoin d'adapter sa trajectoire de façon importante. C'est pourquoi nous observons une évolution du profil de vitesse proche de l'évolution de vitesse de croisière si aucune action n'est produite sur le joystick (Fig. 21). A l'inverse, dans les conditions HR et A1 où A1 est présent et initialement positionné de la même façon, une adaptation motrice est obligatoire pour éviter une collision et réussir la tâche, c'est pourquoi nous observons une variation du profil de vitesse au cours de l'interaction plus importante (Fig. 21).

### **Distance de croisement**

Le résultat principal de cette section est que la distance de croisement avec A2 dans la condition HR (2,01m) est supérieure à celle dans la condition PA2 (1,86m). Nous considérons alors que les différences dans les distances de croisement observées avec A2 sont liées aux adaptations motrices induites par l'évitement d'A1.

Plus une déviation de trajectoire est réalisée prématurément dans l'interaction, plus son impact sera important sur la distance de croisement avec un marcheur. Dans la condition HR, le participant se doit de modifier son comportement plus tôt que dans la condition PA2. Ceci pourrait expliquer en partie la différence de distance de croisement avec A2 entre les conditions HR et PA2.

Avec ces différences observées dans le profil de vitesse ainsi que dans les distances de croisement avec A2, nous pouvons logiquement suggérer que les participants n'ont pas adapté leur déplacement uniquement en fonction d'A2 mais bien en fonction d'A1 et A2 au cours des essais. Ceci vérifie notre seconde sous hypothèse et soutient notre hypothèse principale d'un traitement simultané des interactions lors d'un évitement de collision à 1 vs. 2.

### **Poursuite de l'analyse de données**

Pour aboutir à une conclusion plus détaillée sur les stratégies employées par un marcheur pour traiter de multiples interactions, l'analyse cinématique doit être approfondie puis mise en relation à une analyse oculométrique afin de mettre en relation les adaptations et les indices pris sur les deux marcheurs.

## Analyse cinématique

Nous avons globalement souligné la capacité des participants à interagir de manière simultanée avec deux marcheurs virtuels. Nous avons déjà pu introduire que les valeurs initiales de MPD ont pu jouer sur l'habileté des participants à percevoir les caractéristiques de l'interaction et évaluer le risque de collision. Par la suite, il serait intéressant d'observer un éventuel effet de la valeur initiale de MPD sur le nombre d'inversions, à savoir si une faible valeur absolue de MPD facilite l'inversion de l'ordre de croisement avec A1.

Pour donner du sens à notre observation, nous essaierons de justifier le choix des participants qui ont interagi de manière simultanée. Au vu de la littérature, nous supposons qu'un marcheur cherche à minimiser ses ajustements moteurs lors d'une tâche de navigation (Pham et al., 2007 ; Basili et al., 2013). Ainsi lors d'un évitement de collision avec un autre marcheur, préserver l'ordre de croisement semble être la stratégie permettant de minimiser ces ajustements (Knorr et al., 2016). Nous voulons donc vérifier, que dans le cadre d'interactions multiples, c'est le traitement simultané des interactions qui minimise les adaptations motrices nécessaire pour accomplir la tâche. Pour cela, il serait intéressant d'évaluer le « coût » associé aux trajectoires issues d'une inversion de l'ordre de croisement avec A1 et aux trajectoires issues d'une préservation de l'ordre de croisement avec A1.

## Analyse oculométrique

Ce type de design expérimental associant environnement virtuel et l'oculométrie est relativement innovant, il est donc difficile de baser les hypothèses de travail sur ce qui a été trouvé dans la littérature. Néanmoins nous pouvons supposer qu'une distribution différente des fixations du regard mettrait en avant les facteurs d'influence du comportement des marcheurs. Par exemple il serait intéressant d'observer la répartition des fixations sur A1 et A2 dans la condition HR lors de la phase d'observation, c'est-à-dire avant toutes adaptations motrices. Nous pourrions alors vérifier que dans les passages avec une inversion de l'ordre de croisement avec A1, qui suggère une interaction simultanée, le temps de fixation d'A2 est supérieur à celui dans les passages sans inversion de l'ordre de croisement avec A1. Vérifier qu'A2 est bien pris en considération dans le choix du participant permettrait de coupler la perception de l'environnement aux réalisations motrices.

## Limites

Les résultats obtenus au cours de cette étude sont encourageants pour l'utilisation de notre dispositif expérimental dans l'étude des interactions entre marcheurs. Néanmoins, certaines

limites de l'étude doivent être énoncées et seront à remédier pour de futurs protocoles expérimentaux :

- Plusieurs retours nous ont été faits sur la monotonie de l'expérimentation qui diminuait leur implication dans la tâche à réaliser. Ceci a pu avoir un effet sur la réussite de la tâche, et sur la façon d'interagir avec l'environnement.
- Même si des études scientifiques ont pu montrer l'intérêt de ces dispositifs dans l'études des interactions entre marcheurs (Olivier et al., 2010), il est important de noter que la perte de champ visuel perturbe la perception de l'environnement (Zeuwts et al., 2016) et donc les interactions avec l'environnement. Passer l'expérimentation dans la salle immersive serait un élément essentiel dès lors qu'un oculomètre compatible avec un tel dispositif sera à notre disposition.
- Un tel dispositif nécessite que le participant soit assis, et non en mouvement. L'inactivité motrice peut alors avoir également un impact sur la perception de l'environnement (Schwarzkopf et al., 2013). Ceci a, semble-t-il, pu avoir un impact sur les interactions avec une faible MPD initiale d'A1.
- Nous avons remarqué que les marcheurs virtuels s'arrêtaient dès lors qu'ils étaient hors de l'écran. Ceci n'a sûrement pas modifié le comportement des participants, mais a pu avoir un léger impact sur quelques données comme les distances de croisement.

Maintenant que nous avons pu présenter et interpréter les résultats de notre étude, nous allons pouvoir conclure ce mémoire dans une dernière partie sur les bénéfices qu'il peut apporter et sur les perspectives de recherches à suivre.

## Conclusion & Perspectives

L'objectif de cette étude était d'apporter de nouvelles connaissances sur les stratégies de traitement de multiples interactions par un marcheur. Grâce à notre expérimentation en milieu virtuel, dans laquelle une tâche d'évitement de collision à 1 vs. 2 a été mise en place, nous avons pu montrer la capacité des participants à interagir de manière simultanée avec deux marcheurs virtuels. Ceci a été observé par le fait que les participants ont adapté leur trajectoire dans une telle situation différemment que lors d'une interaction avec un seul marcheur. En effet, nous avons observé que l'ordre de croisement avec un premier marcheur a pu être inversé en raison de la présence d'un second marcheur, tandis qu'il est habituellement conservé dans une interaction avec un seul marcheur.

Cependant, un traitement simultané n'est pas observé de manière absolue dans cette étude. En effet, nous remarquons toujours un nombre conséquent de passages qui ne correspondent pas aux critères d'interactions simultanés que nous avons proposés. De plus, ces résultats ne sont valables que pour la situation qui a été mise en place, c'est-à-dire avec seulement deux marcheurs virtuels provenant du même côté, se déplaçant à la même vitesse et suivant la même direction.

Nos résultats mettent en évidence la capacité des marcheurs à interagir de manière simultanée avec plusieurs autres marcheurs. Mais ceci ne peut être soutenu que par la mise en place de nouveaux protocoles expérimentaux grâce à l'utilisation d'environnements virtuels. Il serait alors intéressant de jouer sur différents facteurs environnementaux comme le nombre de marcheurs à éviter, leur vitesse de marche ou encore leur direction. Ceci servira à mieux comprendre et plus finement modéliser le comportement d'un marcheur lorsqu'il doit interagir avec plusieurs éléments au sein d'un environnement encombré, comme une foule de piétons.

## Bibliographie

- Araújo, D., & Davids, K. (2016). Team synergies in sport: Theory and measures. *Frontiers in Psychology*, 7.
- Basili, P., Sağlam, M., Kruse, T., Huber, M., Kirsch, A., & Glasauer, S. (2013). Strategies of locomotor collision avoidance. *Gait & Posture*, 37(3), 385-390.
- Bideau, B., Kulpa, R., Vignais, N., Brault, S., Multon, F., & Craig, C. (2010). Using virtual reality to analyze sports performance. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 30(2), 14-21.
- Bruneau, J., Olivier, A. H., & Pettre, J. (2015). Going through, going around: A study on individual avoidance of groups. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 21(4), 520-528.
- Chihak, B. J., Plumert, J. M., Ziemer, C. J., Babu, S., Grechkin, T., Cremer, J. F., & Kearney, J. K. (2010). Synchronizing self and object movement: how child and adult cyclists intercept moving gaps in a virtual environment. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 36(6), 1535.
- Cinelli, M. E., Patla, A. E., & Allard, F. (2008). Strategies used to walk through a moving aperture. *Gait & posture*, 27(4), 595-602.
- Cutting, J. E., Vishton, P. M., & Braren, P. A. (1995). How we avoid collisions with stationary and moving objects. *Psychological review*, 102(4), 627.
- Duives, D. C., Daamen, W., & Hoogendoorn, S. P. (2013). State-of-the-art crowd motion simulation models. *Transportation research part C: emerging technologies*, 37, 193-209.
- Fajen, B. R., & Warren, W. H. (2003). Behavioral dynamics of steering, obstacle avoidance, and route selection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(2), 343.
- Fink, P. W., Foo, P. S., & Warren, W. H. (2007). Obstacle avoidance during walking in real and virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 4(1), 2.
- Fotios, S., Uttley, J., & Yang, B. (2015). Using eye-tracking to identify pedestrians' critical visual tasks. Part 2. Fixation on pedestrians. *Lighting Research & Technology*, 47, 149-160.
- Foulsham, T., Walker, E., & Kingstone, A. (2011). The where, what and when of gaze allocation in the lab and the natural environment. *Vision research*, 51(17), 1920-1931.
- Gérin-Lajoie, M., Richards, C. L., & McFadyen, B. J. (2005). The negotiation of stationary and moving obstructions during walking: anticipatory locomotor adaptations and preservation of personal space. *Motor control*, 9(3), 242-269.
- Gérin-Lajoie, M., Richards, C. L., Fung, J., & McFadyen, B. J. (2008). Characteristics of personal space during obstacle circumvention in physical and virtual environments. *Gait & posture*, 27(2), 239-247.
- Hardiess, G., Hansmann-Roth, S., & Mallot, H. A. (2013). Gaze movements and spatial working memory in collision avoidance: a traffic intersection task. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 7, 62. <http://doi.org/10.3389/fnbeh.2013.00062>
- Helbing, D., & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51(5), 4282.
- Huber, M., Su, Y. H., Krüger, M., Faschian, K., Glasauer, S., & Hermsdörfer, J. (2014). Adjustments of speed and path when avoiding collisions with another pedestrian. *PLoS one*, 9(2), e89589.
- Jovancevic-Misic, J., & Hayhoe, M. (2009). Adaptive gaze control in natural environments. *Journal of Neuroscience*, 29(19), 6234-6238.

- Knorr, A. G., Willacker, L., Hermsdörfer, J., Glasauer, S., & Krüger, M. (2016). Influence of person-and situation-specific characteristics on collision avoidance behavior in human locomotion. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 42(9), 1332-1343.
- Kormanová, A. (2014). A review on macroscopic pedestrian flow modelling. *Acta Informatica Pragensia*, 2(2), 39-50.
- Kowler, E. (2011). Eye movements: The past 25years. *Vision research*, 51(13), 1457-1483.
- Levine, D., Richards, J., & Whittle, M. W. (2012). *Whittle's gait analysis*. Elsevier.
- Loomis, J. M., Blascovich, J. J., & Beall, A. C. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 31(4), 557-564.
- Louveton, N., Bootsma, R. J., Guerin, P., Berthelon, C., & Montagne, G. (2012). Intersection crossing considered as intercepting a moving traffic gap: Effects of task and environmental constraints. *Acta psychologica*, 141(3), 287-294.
- Mantuano, A., Bernardi, S., & Rupi, F. (2016). Cyclist gaze behavior in urban space: An eye-tracking experiment on the bicycle network of Bologna. *Case Studies on Transport Policy*.
- Marigold, D. S., Weerdesteyn, V., Patla, A. E., & Duysens, J. (2007). Keep looking ahead? Re-direction of visual fixation does not always occur during an unpredictable obstacle avoidance task. *Experimental Brain Research*, 176(1), 32-42.
- Moussaïd, M., Helbing, D., & Theraulaz, G. (2011). How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(17), 6884-6888.
- Olivier, A.H., Bruneau, J., Kulpa, R. et Pettré, J. (sous-press). Walking with virtual people: Evaluation of locomotion interfaces in dynamic environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, sous presse.
- Olivier, A. H., Marin, A., Crétual, A., & Pettré, J. (2012). Minimal predicted distance: A common metric for collision avoidance during pairwise interactions between walkers. *Gait & posture*, 36(3), 399-404.
- Olivier, A. H., Marin, A., Crétual, A., Berthoz, A., & Pettré, J. (2013). Collision avoidance between two walkers: Role-dependent strategies. *Gait & posture*, 38(4), 751-756.
- Olivier, A. H., Ondřej, J., Pettré, J., Kulpa, R., & Cretual, A. (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* (pp. 117-124).
- Ondřej, J., Pettré, J., Olivier, A. H., & Donikian, S. (2010, July). A synthetic-vision based steering approach for crowd simulation. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)* (Vol. 29, No. 4, p. 123).
- Patla, A.E. (1997) Understanding the roles of vision in the control of human locomotion. *Gait and Posture*, 5, 54-69. doi:10.1016/S0966-6362(96)01109-5.
- Pham, Q. C., Hicheur, H., Arechavaleta, G., Laumond, J. P., & Berthoz, A. (2007). The formation of trajectories during goal-oriented locomotion in humans. II. A maximum smoothness model. *European Journal of Neuroscience*, 26(8), 2391-2403.
- Riley, M. A., Richardson, M. J., Shockley, K., & Ramenzoni, V. C. (2011). Interpersonal Synergies. *Frontiers in Psychology*, 2, 38. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00038>.
- Schwarzkopf, S., von Stülpnagel, R., Büchner, S. J., Konieczny, L., Kallert, G., & Hölscher, C. (2013). What lab eye-tracking tells us about wayfinding. a comparison of

stationary and mobile eye-tracking in a large building scenario. In *Eye Tracking for Spatial Research, Proceedings of the 1st International Workshop (in conjunction with COSIT 2013)* (pp. 31-36).

- Van den Berg, J., Lin, M., & Manocha, D. (2008). Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on* (pp. 1928-1935).
- Zeuwts, L., Vansteenkiste, P., Deconinck, F., van Maarseveen, M., Savelsbergh, G., Cardon, G., & Lenoir, M. (2016). Is gaze behaviour in a laboratory context similar to that in real-life? A study in bicyclists. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 43, 131-140.

# Annexes

Tableau Annexe 1 : Organisation des passages en fonction de la configuration environnementale, et ce tableau pour chaque condition.

MPD A1 initial	Côté d'interaction	Répétition	Participant 1	Participant 2	...	Participant 18
-0,8	Gauche	1	Collision	Pas collision		
-0,8	Gauche	2	Pas collision	...		
-0,5	Gauche	1	...			
-0,5	Gauche	2				
-0,2	Gauche	1				
-0,2	Gauche	2				
0,2	Gauche	1				
0,2	Gauche	2				
0,5	Gauche	1				
0,5	Gauche	2				
0,8	Gauche	1				
0,8	Gauche	2				
-0,8	Droit	1				
-0,8	Droit	2				
-0,5	Droit	1				
-0,5	Droit	2				
-0,2	Droit	1				
-0,2	Droit	2				
0,2	Droit	1				
0,2	Droit	2				
0,5	Droit	1				
0,5	Droit	2				
0,8	Droit	1				
0,8	Droit	2				