HAL
open science

Etude du piéton en réalité virtuelle: état de l'art, enjeux et perspectives

Anne-Hélène Olivier, Jean-Michel Auberlet, Aurélie Dommes, Marie-Axelle Granie, Ludovic Hoyet, Julien Pettré

To cite this version:

Anne-Hélène Olivier, Jean-Michel Auberlet, Aurélie Dommes, Marie-Axelle Granie, Ludovic Hoyet, et al.. Etude du piéton en réalité virtuelle: état de l'art, enjeux et perspectives. International Conference Olympic Games, State of the Art, Jun 2018, Champ sur Marne, France. hal-01820093

HAL Id: hal-01820093

https://inria.hal.science/hal-01820093

Submitted on 30 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.

ETUDE DU PIETON EN REALITE VIRTUELLE: ETAT DE L'ART, ENJEUX ET PERSPECTIVE

Olivier, AH.[1], Auberlet[2], JM., Dommes[2], A., Granié[3], MA, Hoyet, L.[4], Pettré, J.[4]

[1] *Univ Rennes, Inria, M2S - EA 7470, F-35000 Rennes, France*
[2] *Université Paris-Est, COSYS, LEPSIS, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, France*
[3] *Univ Lyon, IFSTTAR, TS2, LESCOT, F-69675, LYON, France*
[4] *Inria, Univ Rennes, CNRS, IRISA - UMR 6074, F-35000 Rennes, France*

INTRODUCTION

L'organisation des Jeux Olympiques soulève des défis de gestion de flux, par exemple pour l'accès aux équipements sportifs et aux lieux touristiques. Dans ce cadre, le déplacement piéton est au cœur des solutions à ces défis : la facilitation et la sécurisation du déplacement piétonnier est au cœur de la stratégie des métropoles répondant à des problématiques de santé, d'environnement, d'aménagement urbain et de transports.

La locomotion humaine représente un champ d'étude extraordinairement vaste de par la diversité des modes locomoteurs. Elle intéresse de nombreux domaines comme les sciences des transports, les sciences du sport, l'ergonomie, la médecine physique, les neurosciences, la robotique ou encore l'informatique graphique. La marche reste un phénomène complexe encore peu connu au regard du contexte urbain, surtout lorsqu'on considère les interactions qu'entretiennent les piétons avec leur environnement. Comment les personnes se déplacent-elles parmi les aménagements urbains, la circulation motorisée ou non motorisée comme le vélo, ou encore entre piétons ? Autant de questions qui nous renvoient la problématique de l'évaluation des nouveaux aménagements et des nouvelles appropriations de l'espace public.

Dans ce contexte, la réalité virtuelle ne cesse de gagner en popularité, et pourrait à plus ou moins court terme devenir un outil ad hoc pour enrichir nos connaissances sur les interactions des piétons avec les autres piétons, les véhicules motorisés ou non et les aménagements et permettre des évaluations a priori, diminuant les coûts des futurs aménagements et des infrastructures.

Cette contribution vise à dresser un bilan de nos connaissances actuelles sur le comportement piétonnier et les outils disponibles dans le domaine de la simulation et de la réalité virtuelle afin de définir les perspectives à court terme sur les recherches nécessaires dans un tel contexte. Dans une première partie, nous recensons les différentes technologies pour la mesure du déplacement piéton, source essentielle pour l'étude du comportement. Elles permettent une observation à différentes échelles, de celle du déplacement du piéton dans la ville à la mesure fine des trajectoires articulaires lors de la locomotion. Nous décrivons ensuite les études menées pour la compréhension des interactions piéton-piéton ou piéton-

environnement. Nous montrons également comment la compréhension fine de certains comportements a été autorisée par les technologies de la réalité virtuelle. Ces connaissances ont été directement appliquée au développement de simulateurs de foules, dont nous listons les grandes catégories d'approches, avant de mentionner les principes de leur évaluation. Enfin nous discutons les enjeux liés aux jeux olympiques.

ETAT DE L'ART

OUTILS DE MESURE DU COMPORTEMENT

Avant de nous intéresser aux travaux qui ont été menés sur l'analyse du comportement du piéton, nous allons présenter les différents outils à disposition des chercheurs pour mesurer le comportement piétonnier. Ces outils s'étendent de la mesure de phénomènes biomécaniques et physiologiques à l'échelle de l'individu, à la mesure de phénomènes plus globaux à l'échelle des déplacements des individus.

A l'échelle de l'individu, nous retrouvons les systèmes de capture de mouvements comme les caméras vidéo, les systèmes optoélectroniques ou encore des combinaisons équipées de systèmes inertiels. Ceci permet d'acquérir les mouvements aussi bien à l'échelle segmentaire (e.g., Hoyet et al. 2013) que globale (e.g. Lemercier et al., 2012) en équipant chaque individu. D'autres outils permettent d'obtenir des informations plus centrées sur l'individu, par exemple en utilisant des oculomètres pour mesurer l'activité du regard, ou en utilisant des capteurs mesurant l'état physiologique de la personne telles que l'activité cardiaque, la respiration, la sudation, etc.

A l'échelle des déplacements, les recherches sur les comportements des piétons ou de la marche peuvent se décomposer selon 3 niveaux de description: 1) les itinéraires partant d'un point A pour aller à un point B et mesurant plusieurs centaines de mètres, 2) des déplacements autour ou dans une localisation singulière de type pôle d'échange et mesurant plusieurs dizaines de mètres, 3) des trajectoires, comme une traversée de rue mesurant plusieurs mètres.

Pour la connaissance des itinéraires longs, les technologies embarquées de type GNSS (sur les smartphones par exemple) sont les outils les plus répandus et les plus utilisés pour l'acquisition de données quantitatives. Ces outils permettent ainsi de mieux connaître les cheminements en termes de volume et de fréquence. La limite de ces outils se situe dans l'absence de connaissance sur le contexte lors de la marche (un trottoir peut être plus utilisé en été parce qu'il est ombragé) et du motif du déplacement (cas d'un déplacement domicile-travail, amener les enfants à l'école etc.). Pour pallier l'absence de connaissance du contexte, certaines études couplent des grilles d'observation à l'utilisation de systèmes GNSS. Dans ce cas, un observateur suit un sujet sur une certaine distance et renseigne la grille d'observation. Concernant les motifs, ils sont souvent connus par les outils d'enquêtes, de questionnaires. Toutefois, les données obtenues le sont souvent dans des conditions statiques (les personnes interrogées ne sont pas dans les conditions du déplacement, les données sont recueillies avant ou après le déplacement).

Les itinéraires sont pour le moment essentiellement étudiés en condition réelle. A notre connaissance, il n'existe pas ou peu d'outils validés permettant de le faire en environnement contrôlé telle qu'une salle de réalité virtuelle ou l'utilisation de logiciels de simulation.

Pour des trajets plus courts, autour d'un point singulier telle qu'une place publique, une gare, une artère commerciale, plusieurs outils permettent de collecter des données. Les systèmes GNSS permettent de connaître les trajectoires et les vitesses. Des capteurs statiques tels que des bornes infra-rouge, Wifi, Bluetooth qui permettent de collecter des

densités, des flux, et parfois des vitesses de parcours entre deux points (Schauer et al., 2014). Des capteurs vidéos permettent de mesurer les vitesses, les trajectoires et la densité dans le champ d'une caméra. Des questionnaires et des grilles d'observations sur les comportements d'usage et de fréquentation du lieu. Si la majorité de ce type d'étude se fait en situation réelle, les progrès des outils de simulation et des dispositifs de réalité virtuelle permettent d'envisager des études plus expérimentales.

Enfin pour les trajets courts tels qu'une traversée de rue, les systèmes à base de capteur vidéo et les grilles d'observations et/ou questionnaires sont les plus souvent utilisés, aussi bien en situation réelle qu'en laboratoire.

Les chercheurs disposent ainsi d'un ensemble d'outils permettant de mesurer les comportements de marche à différentes échelles. Leurs limites sont liées aux conditions d'utilisations, soit en environnement réelle (in situ), soit en environnement contrôlé (in virtuo). La complémentarité émergente de ces observations soulève la question de développer de nouveaux outils permettant de faciliter le recueil de données à grande échelle et/ou en toute sécurité.

COMPORTEMENT DU PIETON EN SITUATIONS REELLES

De nombreuses études ont été menées pour décrire et comprendre le comportement du piéton dans des situations réelles (à distinguer des situations virtuelles développées ci-après), en recueillant des données de terrain ou bien en mettant en place des situations plus standardisées de laboratoire. Si l'on considère dans un premier temps la manière dont la trajectoire locomotrice est contrôlée, les auteurs ont décrit de nombreux invariants comme la stéréotypie de la trajectoire de marche pour des positions/orientations de départ et d'arrivée données (Hicheur et al., 2007), signifiant que l'ensemble des marcheurs produisent une trajectoire très similaire, ou encore une relation entre la courbure et la vitesse de la trajectoire de marche (Hicheur et al., 2005), la séquence de réorientation temporelle segmentaire top-down avec la tête qui anticipe le changement de direction de la marche (Bernardin et al., 2012), ou encore les stratégies de poses de pieds utilisées pour tourner (Hase & Stein, 1999).

Dans un cadre plus écologique, de nombreuses études concernent les itinéraires, pour lesquels on peut distinguer deux classes : 1°) les itinéraires de type consommateurs ou contraints. C'est le cas des trajets domicile-travail, pour aller faire des courses, emmener les enfants à l'école. Ces itinéraires répondent à une demande à satisfaire, et 2) les déplacements « acteurs » ou libres. Il s'agit ici de trajets touristiques, de type flânerie, ou l'itinéraire ne répond à aucune logique de contrainte (temps de parcours destination…). Dans la première classe, l'humain se déplaçant à pied est souvent dénommé piéton, alors que dans la deuxième il est plutôt appelé marcheur. Dans le domaine des transports, le sujet d'étude est presque exclusivement le piéton, qui répond à une logique de déplacement d'un point A à un point B sous contrainte temporelle. Les thématiques de recherche peuvent concerner la mobilité des plus jeunes à celles des plus âgées et peuvent être abordées par plusieurs champs disciplinaires telle que la géographie, la psychologie, l'économie et la sociologie.

Dans le contexte de l'interaction avec les différents éléments de l'environnement, les études ont analysé la manière dont un marcheur franchit (Patla & Greig, 2006) ou contourne un obstacle fixe (Vallis & McFadyen, 2003), ou encore passe par une ouverture (Hackney & Cinelli, 2013 ; Warren & Whang, 1987). Dans le cadre plus spécifique de l'interaction entre deux marcheurs, les auteurs ont montré que ces derniers sont capables de prédire de façon précise le risque futur de collision (Olivier et al., 2012). Le risque futur de collision a été quantifié comme la distance future de croisement (MPD : "Minimum Predicted Distance", également appelée "distance of closest approach"), calculée grâce à une extrapolation linéaire

des trajectoires des deux marcheurs (vitesse + orientation). Ainsi, une modification de la trajectoire de marche a été observée uniquement si la MPD au début de l'interaction était inférieure à un mètre. Autrement dit, les marcheurs adaptent leur trajectoire de marche uniquement si cela est nécessaire, i.e, la distance future de croisement au début de l'interaction est trop faible. L'analyse de l'évolution de la MPD au cours du temps a permis de mettre en évidence 3 phases dans l'interaction (Olivier et al., 2012) : 1) une phase d'observation pendant laquelle les marcheurs ne modifient pas leur trajectoire de marche (la MPD est constante), 2) une phase de réaction pendant laquelle les marcheurs modifient leur trajectoire de marche afin d'augmenter la distance future de croisement (la MPD augmente), 3) et enfin une phase de régulation pendant laquelle la MPD est maintenue à un niveau constant. Cette dernière phase montre que l'adaptation des trajectoires de marche est terminée avant la fin de l'interaction, ce qui montre que ces stratégies sont anticipatrices. L'adaptation de la trajectoire locomotrice durant la phase de réaction peut alors s'effectuer par une modification de la vitesse et/ou de direction de la marche (Olivier et al., 2013). Le choix de ce type de stratégies locomotrices dépendrait de la situation (vitesse de marche, angle de croisement) (Huber et al., 2014 ; Knorr et al., 2016), plutôt que des caractéristiques liées aux individus comme leur genre ou leur personnalité (Knorr et al., 2016). Par ailleurs le choix de ces stratégies ne serait pas basé sur un critère d'optimalité (Basili et al., 2013) mais reposerait sur un compromis entre sécurité et énergie (Jansen et al., 2011). Enfin, bien que la situation d'évitement de collision soit une tâche collaborative, i.e., les deux marcheurs contribuent à l'évitement de collision, des rôles seraient attribués à chaque marcheur en fonction de leur ordre de passage au croisement (le marcheur qui passe premier et celui qui passe second). En effet, le marcheur qui passe second contribue plus à augmenter la MPD que celui qui passe premier (Olivier et al., 2013). L'ordre de passage n'est pas modifié au cours de l'interaction et peut être prédit avec un niveau de confiance à 95% 2,5m avant le croisement (Knorr et al., 2016).

Une des tâches parmi les plus complexes pour les piétons dans la ville est celle d'interagir avec les véhicules, et de traverser la rue. En effet, la majorité des accidents piétons en milieu urbain concerne la traversée de rue et l'interaction d'un piéton avec un engin souvent motorisé. Une autre source d'accidentologie piétonne sont les chutes, pour lesquelles nous ne disposons pas de données statistiques précises. Concernant les accidents, les études de cas réel se font sous deux approches temporelles : 1°) a posteriori, l'accidentologie et 2°) a priori, les études des comportements. La première approche permet ou a pour objectif d'identifier soit les scénarios d'accident, soit les lieux accidentogènes. La deuxième permet d'identifier et/ou de qualifier par exemple les comportements impliqués dans les interactions.

Si la tâche de traversée de rue est complexe car elle fait intervenir des compétences visuelles, cognitives, décisionnelles et physiques, elle est surtout dangereuse, car la collision avec un véhicule à l'approche peut mener à un accident (plus ou moins grave), voire au décès. Les piétons sont en cela communément identifiés comme "vulnérables" par l'absence de protection matérielle, étant donc ainsi plus exposés au risque d'être blessés gravement ou tués en cas de collision. Pour traverser la rue, le piéton doit tout d'abord sélectionner un site adapté. Dans le cas où l'infrastructure ne propose pas d'endroit spécifique déclaré prioritaire par la loi (ex. zébra), ou lorsque le passage piéton ne dispose pas de signaux lumineux réservés au piéton (i.e. bonhomme vert/rouge), le piéton doit, de lui-même, détecter le trafic, combiner des informations provenant parfois de plusieurs directions, déterminer si le temps restant avant que les véhicules à l'approche ne l'atteignent est suffisamment long pour traverser, et enfin adapter son action à la perception continue du trafic à l'approche.

Les données recueillies en situations réelles les plus illustratives du caractère dangereux de cette tâche sont les données d'accidents. En 2016, les piétons représentaient près de 16% des tués sur nos routes en France (ONISR, 2017). Les piétons âgés de plus de 75 ans sont les plus touchés : ils représentaient en 2016 près de 40% de la mortalité piétonne pour une part dans la population de 9% seulement. Les chiffres sont par ailleurs très élevés en ville, et lorsque les piétons traversent en dehors de zones qui leur sont consacrées (37% des tués à plus de 50m d'un zébra en 2016). Mais beaucoup d'accidents concernent aussi des traversées sur passage piéton (27%). Depuis l'an 2000, la catégorie des piétons est en fait celle qui, avec les motocyclistes, a le moins bénéficié de l'amélioration globale de la sécurité routière en France. La part des piétons tués dans l'ensemble de la mortalité française a augmenté : si la part des automobilistes tués dans la mortalité routière totale a notablement diminué (65 % en 2000 contre 50 % en 2016), celle des piétons a augmenté (10 % en 2000 contre 16% en 2016).

Des analyses détaillées d'accidents, telle celle menée par Martin et Wu (2015), ont permi d'identifier différents types de "défaillance" à l'origine de l'accident selon qu'elles émanent du conducteur ou du piéton, en termes d'erreur de détection, de décision, de diagnostic, ou de pronostic. Côté conducteur, un certain nombre de défaillances seraient liées à un problème de détection du piéton, particulièrement lorsque les véhicules tournent à gauche alors qu'un piéton traverse, ou encore dans les cas de marche arrière. La deuxième défaillance la plus souvent relevée par Martin et Wu (2015) chez les conducteurs renvoie aux erreurs de pronostic et d'anticipation, particulièrement lorsqu'ils roulent tout droit et qu'un piéton traverse la chaussée à une intersection, ou lorsque le piéton longe la chaussée. Les défaillances attribuées au piéton comptent une proportion équivalente d'erreurs au niveau de la détection que de la décision. Mais dans 23% des cas, aucune défaillance n'est identifiée côté piéton (contre 9% d'absence de défaillance côté conducteur, cf. Martin & Wu, 2015).

Pour permettre de mieux comprendre l'origine des accidents et les défaillances possiblement attribuables au piéton, beaucoup de travaux ont été menés ces dernières décennies, en situations réelles notamment, à partir, par exemple, de vidéos (e.g., Zuang & Wu, 2011), d'observations sur site (e.g., Dommes et al., 2015), ou de questionnaires (c.f. e.g., Granié et al., 2013). La littérature s'accorde à révéler plusieurs facteurs importants dans les choix de traversée de rue, liés à l'infrastructure (présence d'un passage piéton, de feux, etc.), aux véhicules (ex. vitesse d'approche), ou encore au piéton lui-même (son âge, son genre, la présence d'autres piétons avec lui, etc.). Si ces nombreux travaux ont fait émaner de très intéressants résultats, ils se sont heurtés à des limites liées à l'étude des comportements en situation réelle : la sécurité des comportements observés n'est pas garantie, la mesure d'indices comportementaux fins est difficile, et le contrôle des variables liées au trafic ou aux piétons délicat. La réalité virtuelle s'avère être un moyen pertinent pour lever ces difficultés.

COMPORTEMENT DU PIETON EN SITUATIONS VIRTUELLES

Les (r)évolutions technologiques nous amènent aujourd'hui à considérer la réalité virtuelle comme un candidat très sérieux voire incontournable pour développer de nouvelles expérimentations visant à mieux comprendre le comportement humain. La réalité virtuelle a été définie par Arnaldi et collaborateurs en 2003 comme étant "un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des dispositifs d'interaction en vue de simuler, dans un environnement virtuel, le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs". Il existe différents dispositifs de réalité virtuelle, les deux majeurs étant la salle de réalité virtuelle autrement appelée CAVE ("Computer Assisted Virtual

Environment) dans laquelle un utilisateur est placé et perçoit le monde virtuel en 3 dimensions grâce à des lunettes stéréoscopiques, et le casque de réalité virtuel appelé HMD (Head Mounted Display). Ces dispositifs de réalité virtuelle se sont révélés être des outils très puissants pour les expériences impliquant les mécanismes de perception-action (Loomis et al., 1999). En effet, la réalité virtuelle permet un contrôle expérimental précis, des manipulations aisées de l'environnement, ainsi que des manipulations impossibles dans la réalité donnant la possibilité par exemple de découpler certains paramètres qui normalement covarient, pour mieux les isoler.

Dans le cadre de l'étude des comportements du piéton, l'acquisition et l'analyse de données sur le mouvement humain est fondamentale. Elle permet par exemple de mettre en place des modèles de mouvement utilisés en réalité virtuelle, à la fois pour la compréhension des comportements piétonniers que pour l'animation d'humanoïdes de synthèse. L'acquisition de ces données dans des conditions réelles permet de maximiser le caractère écologique de l'analyse et de se placer au plus près de la réalité. La réalité virtuelle est très utile pour pallier les difficultés soulevées par les expériences réelles mentionnées précédemment. On voit également l'intérêt de cette technologie dans des applications liées aux interactions entre des piétons et des véhicules comme par exemple les traversées de rue, et encore plus chez des personnes vulnérables comme l'enfant ou la personne âgée, ou la sécurité des participants est garantie.

Toutefois, de nombreuses études ont montré que dans un environnement virtuel, la perception des distances (Loomis et al., 1999) ou encore la vitesse de déplacement (Fink et al., 2007) étaient différentes, que la marche pouvait être plus instable (Hollman et al., 2007), et que les utilisateurs pouvaient souffrir du "mal du virtuel" (Loomis et al., 1999), qui s'apparente à des symptômes similaires à ceux du mal des transports. Ainsi, il apparaît fondamental de proposer une démarche de conception de plate-forme de réalité virtuelle pour l'analyse du mouvement humain qui doit tenir compte des techniques et interfaces les plus adaptées pour induire au mieux des réponses similaires en environnements réels et virtuels dans des tâches spécifiques et ainsi limiter tout biais expérimental et toute conclusion erronée sur le comportement humain. On peut alors se référer à l'étude de Olivier et al. (2017) qui montre que d'un point de vue qualitatif les résultats lors d'une tâche d'évitement de collision avec un autre marcheur est très similaire en environnement réel et dans une salle de réalité virtuelle au sein de laquelle l'utilisateur se déplace au moyen d'un joystick. Les mêmes conclusions ont été faites en considérant l'interaction lors d'une tâche d'évitement de collision avec un humain virtuel statique dans le cas où l'utilisateur marchait réellement avec un casque de réalité virtuelle (Silva et al., 2018).

Les études ont alors considéré les interactions entre un marcheur et son environnement dans des paradigmes impliquant la réalité virtuelle. Dans le cas d'une interaction entre une personne réelle et un marcheur virtuel, les recherches se sont intéressées à la nature des variables utilisées pour la perception du mouvement de l'autre. En particulier, les auteurs ont cherché à mettre en évidence si le marcheur prenait en compte les informations issues de la trajectoire globale ou plus localement du mouvement des segments de l'autre marcheur avec qui il interagit (Lynch et al., 2017) ou encore l'effet du contact visuel lors de l'interaction (Lynch et al., 2018).

Dans le cadre de situations impliquant le marcheur en interaction avec le milieu urbain, d'autres études se sont intéressées aux traversées de rue. Depuis ces dernières années, beaucoup de travaux ont utilisé la réalité virtuelle pour mieux comprendre, par exemple, pourquoi les personnes âgées sont si représentées dans les accidents piétons. Dans le prolongement des données recueillies en environnement réel, elles ont permis de mettre en

lumière des difficultés liées à l'avancée en âge dans la capacité du piéton à déterminer le temps disponible pour traverser (qui est fonction du temps entre les véhicules à l'approche) et de le relier au temps nécessaire pour traverser (qui est fonction de facteurs environnementaux comme la largeur de la route, et de facteurs personnels comme la vitesse de marche). Des travaux menés sur simulateur grande-échelle (ou CAVE) au cours desquels des participants franchissent une distance réelle de plus de 7 mètres face à des véhicules virtuels approchants ont permis de mettre en lumière des stratégies particulières de prise de décision avec l'avancée en âge pouvant expliquer l'occurrence de comportements parfois dangereux. On constate notamment des stratégies simplificatrices basées sur la distance des véhicules approchant, du type "le véhicule est loin, je traverse" versus "le véhicule est près, je ne traverse pas", négligeant ainsi les informations relatives à la vitesse d'approche du véhicule (Dommes et al., 2014), ou encore un manque de prise en compte de la seconde voie dans le cas des rues à double sens de circulation, les piétons âgés basant principalement leur décision de traverser en fonction de la voie la plus proche d'eux, au contraire des individus plus jeunes qui parviennent à prendre en compte les deux voies (Dommes et al., 2014).

L'étude des comportements de traversée de rue sur simulateur mise en relation avec les performances des mêmes individus à des tests fonctionnels et cliniques (testant l'efficience de capacités plus globales, i.e., visuelles, cognitives et motrices, hors contexte) a permis d'aller plus loin et de questionner l'origine de ces effets de l'âge. Sur simulateur, des travaux montrent ainsi que la façon dont le piéton âgé prend ses décisions de traversée la rue pouvait être prédite par un ensemble d'habiletés perceptivo-cognitives plus générales (Dommes et al., 2011, 2013, 2015). La vitesse de traitement des informations visuelles et les capacités d'attention visuelle se révèlent parmi les plus prédictives. Ces habiletés permettent à l'individu de focaliser son attention sur les informations pertinentes de l'environnement, et d'émettre des décisions rapides dans un temps imparti court. Le déclin des fonctions exécutives (inhibition des informations non pertinentes, flexibilité mentale, et mise à jour des informations en mémoire de travail) jouerait également un rôle important. D'autres habiletés comme la capacité de l'individu à estimer correctement le temps d'approche d'un objet (dans notre cas, un véhicule) sont aussi essentielles à la prise de décision. Les capacités physiques à se mouvoir interviennent ensuite, une fois la décision de traverser prise. Le ralentissement de la vitesse de marche, la réduction de la longueur du pas, les difficultés à maintenir son équilibre, sont des facteurs importants qui entravent la mobilité du piéton âgé lorsqu'il traverse la rue. Les piétons âgés ont par ailleurs tendance à regarder leurs pieds lorsqu'ils se déplacent (Avineri et al., 2012), nuisant dès lors à l'adaptation de leur pas à la perception continue du trafic à l'approche. Et même s'ils regardaient la circulation en traversant, leurs prises de décision non optimales seraient difficilement compensées en marchant plus vite ou en augmentant la longueur du pas à cause du déclin plus général de leurs capacités physiques. Ces connaissances, acquises au moyen de la réalité virtuelle, et validées internationalement par plusieurs études (e.g., Gerarghty et al., 2016), sont essentielles à la formulation de recommandations adaptées, comme des programmes de ré-entraînement cognitif et / ou physiques pour personnes âgées, des campagnes de prévention pour une meilleure connaissances des dangers de la traversée de rue, des modifications d'infrastructures (ex. développement de zones piétonnes et partagées, abaissement des vitesses, îlot central, etc.) et le développement de véhicules plus sûrs (e.g., détection de piéton et freinage automatique).

SIMULATEURS DE FOULE

Les connaissances ainsi créées sur le comportement du piéton et de ses interactions avec l'environnement et les autres piétons autorisent la conception de simulateur de foule dont l'objectif est de reproduire le plus fidèlement possible le déplacement de foules réelles, afin par exemple d'en prédire le comportement d'interaction entre individus, mais également avec l'infrastructure et le trafic.

Les simulateurs de foule se divisent en deux grandes catégories d'algorithmes. D'une part, les approches macroscopiques modélisent la foule comme une matière active compressible (Hughes, 2003 ; Treuille et al., 2006). Le calcul des variations de cette densité dans l'espace et dans le temps selon un principe de continuum permet une estimation d'un mouvement collectif. Rapides, les algorithmes macroscopiques tendent à ne prendre en compte que des foules uniformes.

Une simulation plus précise des comportement individuels est permise par les approches microscopiques. Elles suivent le paradigme des systèmes complexes : le comportement collectif résulte de la combinaison d'interactions entre individus (appelés agents). L'approche repose donc fondamentalement sur le concept de modèle d'interaction locale, qui peut se concevoir de différentes manières. Une première, par automate cellulaire (Blue & Adler, 1998 ; Schadschneider, 2002), consiste à discrétiser le mouvement individuel dans l'espace et le temps, et de simuler le mouvement de chaque agent comme celui d'un pion sur un échiquier. Une deuxième, le modèle des forces sociales (Helbing, 1995) permet un calcul de trajectoires continues pour les agents. Elle s'inspire de la 2eme loi de Newton pour simuler le mouvement des agents soumis à des forces : forces d'attraction vers leurs buts, et forces de répulsion entre agents pour éviter les collisions entre eux. Cette approche ne reflète cependant pas les capacités d'anticipation humaines car les magnitudes des forces d'interactions sont proportionnellement inverses aux distances qui les séparent. Cette anticipation est prise en compte dans les modèles dits "basés vitesse", inspirés de techniques d'évitement de collision en Robotique (Fiorini & Shiller, 1998). En prenant en compte les vitesses de déplacement des agents, les distances futures de croisement sont calculées. Les agents ont pour règle de déplacement d'adopter une vitesse et un cap qui leur permettent toujours de garantir une distance suffisante de croisement avec les agents voisins dans un futur proche (Paris et al., 2007 ; van der Berg et al., 2008 ; Karamouzas et al., 2009). Enfin, plus récemment, certains simulateurs mettent en place un principe d'optimisation locale : les agents se déplacent afin d'optimiser un ensemble de critères exprimés à travers une fonction de navigation dont les variables dépendent de l'état de l'agent et de celui de ses voisins (Karamouzas et al., 2014 ; Dutra et al., 2017). La minimisation de cette fonction permet le contrôle de la trajectoire de l'agent.

La plupart de ces modèles sont développés pour des champs d'utilisation précis, à savoir des densités de foules particulières. Ainsi les phénomènes transitoires sont mal pris en compte. Par ailleurs, le piéton est vu comme une particule pour laquelle les aspects cognitifs sont encore peu intégrés quand les dimensions sociaux-psychologiques sont absentes de la modélisation. Ceci amène de nombreux chercheurs à proposer des surcouches à des modèles pour répondre aux cas d'étude de leur recherche.

EVALUATION DU REALISME DES SIMULATEURS

Un simulateur de foule est dit réaliste s'il est capable de prédire le mouvement d'une foule réelle placé dans les mêmes conditions que la simulation. Cette évaluation d'un simulateur de foule est rendue difficile pour au moins deux raisons. D'une part, la variabilité du comportement humain rend l'évolution du mouvement collectif chaotique. Une variation

moindre des interactions entre individus peut se répercuter au long terme sur l'ensemble des trajectoires individuelles. Aussi, le réalisme concerne différentes échelles des trajectoires : l'échelle locale (quelques individus sur une courte période) ou globale (sur des données agrégées). L'évaluation d'un modèle macroscopique sera simplifiée car la deuxième échelle est concernée seulement : à cette fin, les diagrammes fondamentaux, décrivant les relations empiriques entre densité de flot et vitesse, sont très utiles (Seyfried et al., 2005). Pour ce qui concerne les modèles microscopiques, il est fait recours à l'utilisation de jeux de données trajectographiques, issues d'expériences de laboratoire (Lemercier et al. 2012 ; Boltes, 2013) ou de techniques de vision par ordinateur. Il est nécessaire pour comparer trajectoires simulées et réelles d'employer des métriques adaptées (Guy et al., 2012 ; Charalambous et al., 2014), et de traiter de la question de l'estimation des paramètres de simulation pour adapter au mieux le simulateur à la situation observée (Wolinski et al., 2014)

De plus, avec le développement des méthodes d'animation et d'informatique graphique, il est désormais possible d'afficher un grand nombre d'humains virtuels de haute qualité visuelle pour représenter ces foules virtuelles, notamment en utilisant différentes techniques d'animation et de rendu pour simplifier les scènes affichées (Beacco et al., 2016). Le développement de tels simulateurs nécessite donc d'évaluer le réalisme du mouvement, de l'apparence, et des comportements de ces foules dans le but d'assurer que les études en Réalité Virtuelle soient réalisées dans des situations aussi écologiques que possibles. Des travaux s'intéressent notamment à l'importance d'intégrer de la variabilité dans l'apparence des personnages virtuels (McDonnell et al., 2008, 2009). Dans la lignée des expériences pionnières de Johansson (1973), des travaux s'intéressent aussi à la question de la perception du mouvement des humains virtuels, par exemple pour mesurer l'importance de mouvements secondaires sur la perception des collisions et du naturel des interactions entre humains virtuels (Hoyet et al., 2016), pour comprendre pourquoi le mouvement de certains personnes sont plus distinctifs que d'autres lorsque présentés sur des humains virtuels et donc plus identifiables (Hoyet et al., 2013), ou encore pour comprendre comment les interactions d'un utilisateur avec un humain virtuel dépendent de l'état émotionnel apparent du personnage (Perrinet et al., 2013). Aujourd'hui, de nombreux travaux incluant ceux des auteurs se focalisent donc sur la perception des mouvements des humains virtuels dans le but de produire des humains virtuels aussi crédibles que possible en fonction des situations étudiées.

ENJEUX ET PERSPECTIVES

Lors des Jeux Olympiques 2024 à Paris, 13 millions de billets sont prévus à la vente, et ainsi autant de visiteurs à accueillir autour et à l'intérieur des structures prévues pour l'événement. L'enjeu de la recherche sur le comportement piéton est d'assister la conception de ces structures pour faciliter cet accueil en étant capable de prédire les interactions, les trajectoires et les itinéraires piétons à travers des aménagements avant leur construction. La simulation de foule permet cette prédiction, la réalité virtuelle permet également une expérience immersive des lieux au stade de la maquette numérique. La combinaison de technologies de la réalité virtuelle et de simulation de foule permettent enfin l'immersion dans des environnements virtuels peuplés, simulant la présence d'usagers. Trois grands axes sont alors à considérer :

1. **L'aménagement urbain** : il s'agit dans ce cas de mieux comprendre l'appropriation de l'espace public ou d'aménagements existants mais également futurs. De premières applications utilisant les casques de RV proposent de visualiser des aménagements futurs en lieu et place d'une maquette réelle. L'utilisateur se promène dans la scène virtuelle mais

sans pouvoir réellement interagir avec son environnement. C'est la prochaine étape cruciale dans le développement de telles applications, car elle permettra de recueillir non seulement les pratiques de l'utilisateur mais également ses perceptions, ses préférences en fonction des options d'aménagement qui pourraient lui être proposés. L'outil devient alors non seulement un outil de production de connaissances mais également un outil d'aide à la décision.

2. **La sécurité et la sûreté** : le but est de pouvoir évaluer différentes configurations/ situations pour améliorer la sécurité et la sûreté des usagers. Nous prendrons comme exemple les navettes autonomes, qui sont amenés à se développer très rapidement et qui seront très probablement électriques, donc silencieuses. Comment vont-elles interagir avec la population ?
3. **La formation et l'apprentissage** : il s'agit alors ici de proposer des outils permettant un apprentissage comme par exemple l'apprentissage de la marche en milieu urbain pour les 6-12 ans (Aubert et al. 2005 ; Junget al. 2003), mais également d'évaluer, former les usagers à interagir avec un robot en milieu naturel.

CONCLUSION

En conclusion, l'organisation des JO 2024 à Paris soulève des questions quant à la conception d'infrastructures et la mise en place de moyens pour l'accueil et la mobilité d'un très grand nombre de visiteurs. Dans ce cadre, simuler de manière réaliste des foules devient fondamental pour aider à répondre à ces questions. Le développement de moyens de simulation réaliste et grande échelle devra répondre aux problématiques liées au déplacement de foules, mais également aux interactions des piétons avec l'infrastructure et d'aménagements urbains. Afin de proposer des simulations réalistes qui se rapprochent au mieux du comportement humain, l'étude du piéton est un enjeu fondamental mais néanmoins complexe. Les nouvelles technologies et en particulier la réalité virtuelle ouvrent les portes d'une analyse de plus en plus fine et contrôlée de ce comportement. La simulation pourra alors permettre de tester différentes configurations, en termes de mobilité, de fluidité des déplacements, de sécurité de la marche, etc., les tests a priori permettant in fine de construire des aménagements plus sûrs et adaptés aux utilisateurs. Le développement de simulateurs grande échelle permettra aussi de simuler les interactions d'un vaste ensemble de piétons avec le trafic, dans sa mixité actuelle et composée de voitures individuelles, de bus, de deux-roues motorisés, de vélos. Les Jeux Olympiques de Londres en 2012 ont été l'occasion de développer et de pérenniser des solutions innovantes pour la conception de lieux publics, comme par exemple à travers l'utilisation de simulateurs de foule pour vérifier les capacités de trafic piéton[1]. De nouvelles pratiques innovantes, liées à l'utilisation combinée de la réalité virtuelle, doivent émerger lors des jeux de Paris 2024.

BIBLIOGRAPHIE

Arnaldi, B., Fuchs, P., & Tisseau, J. (2003). Chapitre 1 du volume 1 du traité de la réalité virtuelle. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 1.

Aubert, G., Charron, C., & Granié, M.-A. (2005). Les fondements psychologiques de Respect,

[1] http://learninglegacy.independent.gov.uk/documents/pdfs/transport/273-crossing-stratford-high-street-trans.pdf

un simulateur éducatif pour l'enfant-piéton. In D. M. d'Huart (Ed.), First International Virtual Reality -Learning Seminar, Virtual Reality International Conference. Laval.

Avineri, E., Shinar, D., & Susilo, Y. O. (2012). Pedestrians' behaviour in crosswalks: The effects of fear of falling and age. Accident Analysis & Prevention, 44, 30-34.

Basili, P., Sağlam, M., Kruse, T., Huber, M., Kirsch, A., & Glasauer, S. (2013). Strategies of locomotor collision avoidance. Gait & Posture, 37(3), 385-390.

Beacco, A., Pelechano, N., & Andújar, C. (2016), A Survey of Real-Time Crowd Rendering. Computer Graphics Forum, 35: 32-50.

Bernardin, D., Kadone, H., Bennequin, D., Sugar, T., Zaoui, M., & Berthoz, A. (2012). Gaze anticipation during human locomotion. Experimental brain research, 223(1), 65-78.

Blue, V., & Adler, J. (1998). Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1644), 29-36.

Boltes, M., & Seyfried, A. (2013). Collecting pedestrian trajectories. Neurocomputing, 100, 127-133.

Charalambous, P., Karamouzas, I., Guy, S. J., & Chrysanthou, Y. (2014). A Data-Driven Framework for Visual Crowd Analysis. Computer Graphics Forum 33(7), 41-50.

Darty K., Saunier J., Sabouret N. (2016). Évaluation et calibration des comportements des agents pour les simulations immersives. Revue d'Intelligence Artificielle 30(1-2): 237-260.

Dommes, A., & Cavallo, V. (2011). The role of perceptual, cognitive, and motor abilities in street-crossing decisions of young and older pedestrians. Ophthalmic & Physiological Optics, 31, 292-301.

Dommes, A., Cavallo, V., Dubuisson, J-B., Tournier, I., & Vienne, F. (2014). Crossing a two-way street: comparison of young and old pedestrians. Journal of Safety Research, 50, 27-34.

Dommes, A., Cavallo, V., & Oxley, J.A. (2013). Functional declines as predictors of risky street-crossing decisions in older pedestrians. Accident Analysis and Prevention, 59, 135-143.

Dommes, A., Granié, M.-A., Cloutier, M.-S., Coquelet, C., & Huguenin-Richard, F. (2015). Red light violations by adult pedestrians and other safety-related behaviors at signalized crosswalks. Accident Analysis and Prevention, 80, 67-75.

Dommes, A., Le Lay, T., Vienne, F., Dang, N.-T., Perrot Beaudoin, A., & Do, M.C. (2015). Towards an explanation of age-related difficulties in crossing a two-way street. Accident Analysis & Prevention, 85, 229-238.

Dutra, T. B., Marques, R., Cavalcante-Neto, J. B., Vidal, C. A., & Pettré, J. (2017, May). Gradient-based steering for vision-based crowd simulation algorithms. Computer Graphics Forum, 36(2), 337-348.

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.

Fiorini, P., & Shiller, Z. (1998). Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles. The International Journal of Robotics Research, 17(7), 760-772.

Geraghty, J, Holland, C & Rochelle, K (2016). Examining links between cognitive markers, movement initiation and change, and pedestrian safety in older adults. Accident Analysis and Prevention, 89, 151-159.

Granié, M.A, Pannetier, M., & Guého, L. (2013). Developing a self-reporting method to measure pedestrian behaviors at all ages. Accident Anal. Prevention, 50, 830–839.

Guy, S. J., Van Den Berg, J., Liu, W., Lau, R., Lin, M. C., & Manocha, D. (2012). A statistical similarity measure for aggregate crowd dynamics. ACM Transactions on Graphics, 31(6), 190.

Hackney, A. L., & Cinelli, M. E. (2013). Young and older adults use body-scaled information during a non-confined aperture crossing task. Experimental brain research, 225(3), 419-429.

Hase, K., & Stein, R. B. (1999). Turning strategies during human walking. Journal of Neurophysiology, 81(6), 2914-2922.

Helbing, D., & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. Physical review E, 51(5), 4282.

Hicheur, H., Vieilledent, S., Richardson, M. J. E., Flash, T., & Berthoz, A. (2005). Velocity and curvature in human locomotion along complex curved paths: a comparison with hand movements. Experimental brain research, 162(2), 145-154.

Hicheur, H., Pham, Q. C., Arechavaleta, G., Laumond, J. P., & Berthoz, A. (2007). The formation of trajectories during goal-oriented locomotion in humans. I. A stereotyped behaviour. European Journal of Neuroscience, 26(8), 2376-2390.

Hollman, J. H., Brey, R. H., Bang, T. J., & Kaufman, K. R. (2007). Does walking in a virtual environment induce unstable gait?: An examination of vertical ground reaction forces. Gait & Posture, 26(2), 289-294.

Hoyet, L., Olivier, A., Kulpa, R. & Pettré, J. (2016). Perceptual Effect of Shoulder Motions on Crowd Animations. ACM Transaction on Graphics, 35(4).

Hoyet, L., Ryall, K., Zibrek, K., Park, H., Lee, J., Hodgins, J. & O'Sullivan, C. (2013). Evaluating the Distinctiveness and Attractiveness of Human Motions on Realistic Virtual Bodies. ACM Transactions on Graphics, 32(6).

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.

Hughes, R. L. (2003). The flow of human crowds. Annual review of fluid mechanics, 35(1), 169-182.

Jansen, S. E., Toet, A., & Werkhoven, P. J. (2011). Human locomotion through a multiple obstacle environment: strategy changes as a result of visual field limitation. Experimental brain research, 212(3), 449-456.

Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and model for its analysis. Perception & Psychophysics, vol. 14, pp. 201-211.

Jung, S., Aubert, G., Charron, C., Granié, M.-A., Grislin-Lestrugeon, E., Lepoutre, F.-X., & Pudlo, P. (2003). Construction d'un simulateur pour l'apprentissage de la mobilité piétonne: RESPECT. Rapport final RES-RFI sur subvention PREDIT 2 / Ministère de la Recherche.

Karamouzas, I., Heil, P., Van Beek, P., & Overmars, M. H. (2009). A predictive collision avoidance model for pedestrian simulation. In International Workshop on Motion in Games (pp. 41-52).

Karamouzas, I., Skinner, B., & Guy, S. J. (2014). Universal power law governing pedestrian interactions. Physical review letters, 113(23), 238701.

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.

Lemercier, S., Jelic, A., Kulpa, R., Hua, J., Fehrenbach, J., Degond, P., ... & Pettré, J. (2012, May). Realistic following behaviors for crowd simulation. Computer Graphics Forum, 31(2pt2), 489-498.

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.

Lynch, S., Kulpa, R., Meerhoff, L., Pettré, J., Crétual, A., & Olivier, AH. (2017). Collision avoidance behavior between walkers: global and local motion cues. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics.

Lynch, S., Pettré, J., Bruneau, J, Kulpa, R., Crétual, A., & Olivier, A.H. (2018) Effect of virtual human gaze behaviour during an orthogonal collision avoidance walking task. IEEE VR 2018, Reutlingen, Germany, March 18-22, 2018.

Martin, J.L., & Wu, D. (2015). Accidentologie des piétons. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, 2015 <hal-01349342>

McDonnell, R., Larkin, M., Dobbyn, S., Collins, S., & O'Sullivan, C. (2008). Clone attack! Perception of crowd variety. ACM Trans. Graph. 27(3).

McDonnell, R., Larkin, M., Hernández, B., Rudomin, I., & O'Sullivan C. (2009). Eye-catching crowds: saliency based selective variation. ACM Trans. Graph. 28(3).

Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière (ONISR) (2017). La sécurité routière en France. Bilan de l'Année 2016. La Documentation Française, Paris.

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., Bruneau, J., Kulpa, R., & Pettré, J. (2017). Walking with virtual people: Evaluation of locomotion interfaces in dynamic environments. IEEE transactions on visualization and computer graphics.

Ondřej, J., Pettré, J., Olivier, A. H., & Donikian, S. (2010). A synthetic-vision based steering approach for crowd simulation. In ACM Transactions on Graphics, 29(4), 123.

Paris, S., Pettré, J., & Donikian, S. (2007). Pedestrian reactive navigation for crowd simulation: a predictive approach. Computer Graphics Forum, 26(3), 665-674.

Patla, A. E., & Greig, M. (2006). Any way you look at it, successful obstacle negotiation needs visually guided on-line foot placement regulation during the approach phase. Neuroscience letters, 397(1), 110-114.

Perrinet, P., Olivier, A.H., & Pettré, J. (2013). Walk with me: interactions in emotional walking situations, a pilot study. ACM Symposium on Applied Perception.

Schadschneider, A. (2002). Traffic flow: a statistical physics point of view. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 313(1-2), 153-187.

Schauer, L., Werner, M., & Marcus, P. (2014). Estimating crowd densities and pedestrian flows using wi-fi and bluetooth. In Proceedings of the 11th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services.

Seyfried, A., Steffen, B., Klingsch, W., & Boltes, M. (2005). The fundamental diagram of pedestrian movement revisited. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2005(10), P10002.

Silva, W. S., Aravind, G., Sangani, S., & Lamontagne, A. (2018). Healthy young adults implement distinctive avoidance strategies while walking and circumventing virtual human vs. non-human obstacles in a virtual environment. Gait & posture, 61, 294-300.

Treuille, A., Cooper, S., & Popović, Z. (2006). Continuum crowds. ACM Transactions on Graphics, 25(3), 1160-1168.

Vallis, L. A., & McFadyen, B. J. (2003). Locomotor adjustments for circumvention of an obstacle in the travel path. Experimental brain research, 152(3), 409-414.

Van den Berg, J., Lin, M., & Manocha, D. (2008). Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation. ICRA 2008, 1928-1935.

Warren, W. H., & Whang, S. (1987). Visual guidance of walking through apertures: body-scaled information for affordances. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 13(3), 371.

Warren, W., & Fajen, B. (2008). Behavioral dynamics of visually guided locomotion. Coordination: neural, behavioral and social dynamics, 45-75.

Wolinski, D., J Guy, S., Olivier, A. H., Lin, M., Manocha, D., & Pettré, J. (2014). Parameter estimation and comparative evaluation of crowd simulations. Computer Graphics Forum 33(2), 303-312.

Zhuang, X. & Wu, C. (2012). The safety margin and perceived safety of pedestrians at unmarked roadway. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 15, 19–131.