

# Modélisation informatique du comportement des piétons

## Notes de lecture

Roland Brémond

**Résumé** Nous passons en revue dans ce documents certains aspects des connaissances actuelles sur les piétons, concernant leur comportement et concernant les possibilités de modélisation informatique de ces comportements. Le piétons est entendu ici comme étant confronté au trafic automobile, par oppositions aux modèles utilisés en modélisation des foules pour lesquels une seule *espèce* est présente. Ce travail était motivé par le montage, avec A. Tom, d'une expérimentation en réalité virtuelle visant à améliorer les connaissances sur la prise d'information par les piétons lors de la traversée de rue (Projet SICAP).

**Keywords** Piéton · Comportement · Réalité Virtuelle · Modélisation

## 1 Modélisation des Comportements

Ishaque et Noland ont réalisé une revue de question sur la modélisation des comportements de traversée piéton [26]. Les auteurs s'intéressent notamment aux aspects « stratégiques » du mode piéton : qu'est-ce qui fait qu'on décide d'aller quelque part à pied<sup>1</sup> ? L'article est centré sur le niveau qu'ils appellent « opérationnel » : marcher, attendre, faire ses courses, avoir des interactions avec les transports publics, etc. Ils s'intéressent en particulier à la vitesse de marche.

L'application principale de ces modèles est l'évacuation de foules. Les piétons sont parfois décrits comme

des disques [20,44], le flux de piétons comme un fluide [19,25]. Les automates cellulaires et les Systèmes Multi-Agent (SMA) sont les deux paradigmes principaux.

Des applications commerciales sont citées, comme *Paxport*, *PedRoute*, *MPSM* [48], *PedFlow*, *SimPed*, *Legion*, mais il n'y a pas de véhicules dans ces modèles. Par contre certains modèles de trafic, comme *VisSim*, *Paramics*, *Aimsun*, *Corsim* (FHWA), *Sumo*, incluent des piétons. Le meilleur modèle semble être *Dracula*, toutefois *VisSim* est en trains d'intégrer le modèle de piéton de Helbing [19]. Les auteurs relèvent deux problèmes communs à ces algorithmes :

- Des « voies » (uni-directionnelles, qui plus est) sont assignées aux piétons ;
- Les piétons doivent être paramétrés, et on manque cruellement de données [2].

De nombreux travaux ont évalué la vitesse de traversée et l'influence de facteurs comme l'âge, le sexe, la motivation, la taille du groupe, le *gap*, la météo, le temps d'attente, l'aménagement, la couleur du feu, etc. En général, on mesure une vitesse moyenne et une V15, pour les adultes et pour les vieux. On est toujours entre 1 et 1,5 m/s. Le délai d'attente semble plus long pour les enfants que pour les adultes ; il dépend surtout du trafic et de la largeur de voie. Si le délai est important, la traversée est plus rapide (les gens marchent plus vite, ils sont pressés ou impatientes).

La décision de traverser est associée à deux facteurs : le *gap acceptance* et la *compliance* (acceptation de la règle, notamment du feu). Ces facteurs sont interdépendants. Par exemple, un lien existe entre *gap* et vitesse de traversée<sup>2</sup>. Les hommes prennent des *gaps* plus courts que les femmes, les groupes des *gaps* plus courts que les personnes isolées. Le *gap* est toujours entre 1,5 et

---

R. Brémond  
East Paris University, LEPSiS, LCPC  
58 Bd Lefebvre, 75015 Paris (France)  
E-mail: roland.bremond@lcpc.fr  
web : perso.lcpc.fr/roland.bremond

<sup>1</sup> Ces notions de *stratégique*, *tactique* et *opérationnel* sont différentes de celles qui sont proposées dans le modèle classique de Allen [1], ce qui incite à se demander si cette hiérarchie n'a pas un caractère un peu artificiel.

<sup>2</sup> Si on accepte un *gap* plus court, on a intérêt à se dépêcher un peu plus

10 secondes. Au feu, les gens patientent volontiers parce qu'ils savent que leur tour va venir. Certains peuvent accélérer au « bonhomme rouge » pour ne pas perdre un cycle de feu. Le respect de la règle peut être temporel (par rapport au feu) ou spatial (traverser dans les clous ou à côté); le non-respect de la règle a principalement pour but de gagner du temps.

D'autres travaux se sont intéressés à la vitesse d'un piéton dans un flux, un peu comme un véhicule dans le trafic, avec la notion de *vitesse désirée*. Les enfants font ralentir leur maman, les groupes sont plus lents que les personnes seules. Les hommes jeunes marchent plus vite, les vieux moins vite<sup>3</sup>. On note aussi que les piétons accélèrent légèrement avant de traverser<sup>4</sup>. La littérature donne surtout des moyennes, peu d'écart-type. A partir des mesures de vitesse dite « libre », les ingénieurs ont cherché, comme pour le trafic, à modéliser la vitesse « contrainte » comme une fonction de la vitesse libre et de la densité de piétons. Jusqu'en 1993, ces équations étaient exclusivement linéaires.

## 2 Simulation microscopique

Dans les modèles de simulation microscopique des piétons, Kitazawa *et al.* proposent d'utiliser la notion de *Information Process Space* (IPS), qui est la région de l'espace autour du piéton dans laquelle il va prélever l'information nécessaire à son déplacement (*computing where to move next*) [28]. Les auteurs souhaitent déterminer la taille et la forme de l'IPS, en analysant des données oculométriques obtenues en environnement virtuel (marche réelle)<sup>5</sup>. Les principaux résultats sont les suivants :

- les piétons regardent par terre (court terme) plutôt que vers les obstacles lointains ;
- les fixations sont principalement comprises dans un cône de l'ordre de 90° ;
- les obstacles statiques sont jugés plus importants que les autres piétons (qui peuvent éviter la collision). de même, la durée de fixation est plus longue sur les personnes qui viennent en sens inverse que sur les personnes qui vont dans le même sens que *ego*.

Psychologiquement, l'IPS peut s'interpréter comme une zone d'attention visuelle. Les auteurs discutent les principaux modèles de simulation de piéton [4, 24, 19] de manière à mettre en évidence que tous ces modèles

implémentent l'IPS, et détaillent son implémentation. Les résultats conduisent les auteurs à proposer, en plus des trois niveaux classiques dans les modèles de Allen [1] repris par Hogendoorn (stratégique, tactique et opérationnel), un niveau encore plus bas, qui consiste à éviter de tomber dans un trou ou de marcher dans quelque chose de pas propre.

Papadimitriou *et al.* ont réalisé une revue de littérature exhaustive sur les modèles de comportement piéton (modèles informatiques de simulation) [40]. Ils examinent les modèles dans deux domaines : choisir son chemin (*path finding*) et traverser la rue<sup>6</sup>. Ils constatent que les modèles de cheminement prennent rarement en compte le trafic routier. De leur côté, les modèles de traversée ont le principal défaut de se focaliser sur un seul des déterminants de la traversée. Finalement, ces deux niveaux (cheminer et traverser) ne sont jamais intégrés, comme s'il n'y avait pas d'interaction.

Les modèles de comportement de traversée sont classés en quatre catégories : études comportementales avant/après (aménagement, feux), *gap acceptance*, niveau de service, choix discret. L'analyse en termes de niveau de service consiste à vérifier que les gens traversent bien là ou c'est prévu. Le choix discret (*utility theory*) compare le coût de plusieurs alternatives. Mais pour aller plus loin, il faut s'intéresser aux motivations des piétons, c'est-à-dire aux déterminants de la décision de traverser. De nombreux auteurs (Hine, Evans, Yagil, Diaz, Holland) ont analysé des questionnaires pour comprendre l'origine des comportements de traversée, et si possible les modéliser. On traite ici des facteurs conscients de la représentation mentale, et des motivations (e.g. théorie du comportement planifié) qui conduisent à la prise de risque subjective. Mais ces facteurs ne suffisent pas non plus à décrire la traversée, si on ne sait pas comment le risque est évalué.

Un autre courant de recherche s'intéresse aux facteurs liés au trafic : *gap acceptance* et théorie de l'utilité. De nombreuses études sont décrites, principalement des modélisations, mais une synthèse est difficile<sup>7</sup>. Une méthode expérimentale intéressante consiste à utiliser une échelle de Likert pour faire noter aux sujets la « difficulté » perçue à traverser, à un endroit ou à un moment donné. Certaines études sont réalisées en laboratoire [46, 39, 52]<sup>8</sup>. L'article conclut sur un manque de prise en compte des interactions piétons-conducteurs, et sur une séparation nuisible entre modèles de déplacement et modèles de traversée.

<sup>3</sup> Quel scoop ! il y a même une étude qui a montré qu'on marche plus vite quand il fait froid.

<sup>4</sup> Sauf ceux qui s'arrêtent, bien entendu.

<sup>5</sup> Les auteurs considèrent l'oculométrie comme un outil permettant de savoir ou se fait la prise d'information. De ce fait, ils négligent la vision périphérique, de même que l'audition.

<sup>6</sup> La décision de traversée correspond à une étape clé dans la description du comportement piéton selon Firth [10].

<sup>7</sup> Curieusement, de nombreux travaux concernent la traversée en section courante.

<sup>8</sup> [31] n'est pas cité.

Tom *et al.* ont proposé une revue de question sur les modèles de décision pour la traversée de rue [51]. L'article explore les modèles de simulation informatique des piétons, et les trouvent insuffisants pour simuler des piétons en situation de traversée. Les interactions avec les véhicules ne sont pas pensées dans les modèles de simulation, et les compétences psychologiques des piétons ne sont pratiquement pas prises en compte. Les compétences des piétons sont décrites par Granié [18] : perceptives, cognitives, méta-cognitives, affectives, sociales et motrices<sup>9</sup>.

Les modèles informatiques examinés sont Blue et Adler [4], qui est un automate cellulaire; Helbing et Molnar [20], modèle de forces « sociales » en partie inspiré par Goffman [16]; Hoogendorn [23] est également inspiré par Goffman, avec un modèle de forces sociales, mais orienté vers la coopération entre acteurs; Teknomo utilise un modèle de forces *ad hoc*, et le valide sur des données d'observation [48]; enfin Paris *et al.* proposent un Système Multi-Agent (SMA) avec une anticipation des mouvements d'autrui qui est en fait une extrapolation linéaire [41]<sup>10</sup>.

Endsley utilise la notion de « conscience de situation » (*situation awareness*) [7], reprise par T. Bellet dans le modèle *CosmoDrive*, qui est un modèle informatique de comportement d'un automobiliste [47]. Ce cadre est applicable au piéton : c'est une boucle perception-interprétation-anticipation-décision. La décision est liée à la tâche et aux connaissances (mémoire à long terme).

Au niveau des facteurs perceptifs, la notion centrale est la saillance visuelle des facteurs de décision. Les aspects *bottom-up* (ascendants, liés au signal visuel) et *top-down* (descendants, liés au sens et aux motivations) sont impliqués, mais l'articulation est mal comprise, et difficile à modéliser [27].

L'anticipation a une composante géométrique, qui se manifeste dans le *gap* : on anticipe un point de collision, des trajectoires (pour soi et autrui) avec un déroulement temporel. Mais il y a derrière cette notion une composante sémantique, qui est la connaissance du fonctionnement du système, et qui permet d'interpréter les signes (feu rouge, clignotant, etc.) comme annonceurs de situations futures. Une possibilité (conforme à Endsley) serait de décrire chaque acteur d'un SMA<sup>11</sup>

<sup>9</sup> Pour modéliser les compétences perceptives et cognitives, on doit identifier les interactions : par exemple, la décision de traverser se base sur l'estimation de ses propres capacités, donc sur une compétence méta-cognitive.

<sup>10</sup> L'article de Gibson de 1938 qui introduit les notions *defield of safe travel*, de *clearance lines*, etc. semble bien se prêter à une implémentation avec des champs de forces, mais cela n'a pas été réalisé jusqu'ici [15]. Peut-on envisager d'implémenter un piéton *Gibsonnien* ?

<sup>11</sup> SMA : Système Multi-Agent.

par sa représentation de la situation (dans laquelle il est inclus). Mundutey a montré que les automobilistes interprètent les signes en utilisant des stéréotypes d'action (attribués à autrui) [37].

En conclusion<sup>12</sup>, Tom *et al.* proposent des éléments pour un modèle de simulation informatique de piéton :

- SMA : modèle d'agents ayant des compétences perceptives et cognitive, et une capacité d'anticipation. Cela implique une représentation de la situation, et une modélisation de la prise d'information (volontaire et involontaire).
- Perception : pour la perception « volontaire », la notion de ressources cognitives limitées est importante [38].
- Recherche d'information, saillance visuelle : Le bon niveau pour la représentation de l'environnement est le niveau sémantique, mais il faudrait pouvoir estimer une saillance *bottom-up* des objets pour l'agent qui les voit, et de même pour celui qui les cherche [55, 45].
- Représentation : la notion de champ de forces semble pratique et souple, mais il faut y intégrer des connaissances sur le fonctionnement du système (voies, clignotants, etc.).
- Anticipation : il est nécessaire de la prendre en compte, mais pour faire le lien avec une décision, il faut associer une notion de coût aux situation rencontrées dans le futur. D'autre part, la pression temporelle (urgence) doit pouvoir s'implémenter dans la fonction de coût.

### 3 Réalité Virtuelle

Les outils de réalité virtuelle ont été utilisés pour l'étude des déplacements automobiles (simulateurs de conduite) et piéton (Cf. en particulier le numéro spécial de la revue *ACM Transactions on Applied Perception*, 4(1), 2007). Beaucoup de travaux sur les piétons s'intéressent à la marche en réalité virtuelle, méthode qui permet de contrôler les variables au prix d'une validité écologique discutable<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> On peut regretter l'absence de Hoc et Amalberti [22, 21] (ou de Rasmussen [43]) dans les auteurs recensés. La traversée de rue est sans doute largement automatisée, utilisant un niveau sub-symbolique, à peine conscient. Amalberti ou Rasmussen pourraient être évoqués pour dire qu'il n'y a anticipation consciente que si la situation présente est identifiée, au moins, au niveau *Rules* du modèle SRK [43].

<sup>13</sup> Une des difficultés de l'immersion porte sur le jugement des dimensions dans une scène virtuelle. Lorsqu'un sujet se plonge mentalement dans la scène, il a une incertitude sur sa propre taille dans le monde virtuel. Il y a en effet un conflit entre taille physique et point de vue calculé. Ce problème est encore plus important pour une projection vidéo, puisque la hauteur de caméra lors de la prise de vue est unique [42].

Frenz *et al.* partent du fait que les piétons sont performants pour discriminer entre deux distances parcourues, en se basant simplement sur des indices visuels (e.g. [54]). Par contre, on observe une tendance à sous-estimer les distance en valeur absolue (de l'ordre de 25%). L'objectif de leur article [12] est de voir si des indices de profondeur (disparité, parallaxe) expliquent cette sous-estimation. Une expérimentation menée dans un CAVE<sup>14</sup> permet de répondre par la négative à cette question. L'explication alternative proposée est que la sous-estimation des distances estimées en valeur absolue serait liée à une représentation mentale elle-même « réduite » de 25%, l'estimation elle-même se faisant sur la base du flux optique (Cf. [29,53] sur le flux optique).

Fortenbaugh *et al.* se sont intéressés à la distance perçue en réalité virtuelle [11]. Ils font visualiser brièvement une scène très simple à des sujets, puis installent un mur virtuel qui cache la cible. Ils demandent alors aux sujets de marcher vers la cible. Pour estimer la distance perçue, ils enregistrent l'angle du déplacement avec l'axe de l'écran (la cible est excentrée). Les hommes sont meilleurs que les femmes, ils ont plus de souplesse dans leur stratégie de choix de l'indice le plus pertinent (auditif ou visuel).

Plusieurs auteurs s'intéressent à la marche en réalité virtuelle. Durgin *et al.* s'intéressent à la perception du mouvement propre en réalité virtuelle [6]. La discussion porte sur les entrées qui sont utilisées pour faire cette estimation (visuelles, vestibulaires, motrices), et sur la manière dont ces entrées sont combinées pour faire cette estimation (e.g. la marche en aveugle)<sup>15</sup>. Sur un tapis roulant (*treadmill*), il semble que la fréquence des pas soit un indice robuste pour estimer le mouvement propre, plus que la longueur des pas. En tout cas, la vitesse perçue quand on marche est plus élevée que la vitesse perçue sans marcher, à flux optique identique. Une autre erreur perceptive identifiée est que lorsqu'on demande aux sujets de marcher à la vitesse d'un flux optique donné (visualisé sur un casque, en HMD<sup>16</sup>), ils marchent environ 40% trop vite.

D'après certains auteurs (e.g. [50]), la perception de la vitesse est essentiellement liée aux indices visuels, alors que d'autres insistent sur la proprioception. Lichtenstein *et al.* ont développé un tapis roulant original, avec une vitesse asservie non pas à la vitesse de marche, mais à la position du marcheur sur le tapis [30].

Fink *et al.* se sont intéressés à l'aspect dynamique de la marche : tourner, éviter les obstacles, trouver son chemin, etc. [9]. Ils comparent la marche en situation écologique et en réalité virtuelle, en s'appuyant sur le

modèle de Fajen et Warren [8]. Ils observent des différences : en Réalité Virtuelle, les gens passent plus loin des obstacles, et marchent moins vite. Leur interprétation est que l'origine de ces différences est à chercher dans l'incertitude sur la position de l'obstacle par rapport au sujet. Toutefois le modèle de Fajen et Warren est validé, ce qui signifie que la Réalité Virtuelle est un bon outil pour étudier la marche (ici, avec un HMD). Entre 2 et 25 mètres, l'estimation des distances est correcte sur site, mais sous-estimée de moitié en Réalité Virtuelle [49]. L'explication n'est pas certaine, mais elle est peut-être due au fait qu'on estime la distance à partir de l'angle de vision. Peut-être que ce biais ne persiste pas en environnement familier, dans lequel on utilise d'autres indices. Dans ce sens, certains résultats suggèrent que ce biais disparaît au bout de 5 minutes d'apprentissage. Mohler *et al.* se sont intéressés à un aspect de la validité écologique des tapis roulants en réalité virtuelle pour simuler la marche : la coordination perception-action est-elle la même qu'en situation naturelle ? [36]. Les jugements de distance étant sous-estimés en réalité virtuelle, on comprend que cela puisse biaiser la coordination.

Lobjois et Cavallo se sont intéressés à l'estimation du *gap*, qui est un paramètre classique dans les modèles de traversée de rue. La notion de *gap acceptance* considère que la décision de traversée utilise, comme donnée d'entrée, une estimation du temps inter-véhiculaire (le *gap*), qui va être comparé à une estimation du temps nécessaire à la traversée, avec une marge de sécurité. Ces travaux ont eu lieu sur le simulateur de l'INRETS à Arcueil, avec une voie en sens unique. Dans un premier article, le *gap* était évalué à partir d'un jugement : on demandait aux sujets d'appuyer sur un bouton si ils estimaient qu'ils pouvaient traverser [31]. C'est d'ailleurs un mode opératoire classique dans la littérature, et dans [32], les auteurs ont voulu voir si le fait de traverser réellement avait un impact sur les décisions, comme cela était également suggéré dans la littérature [52]. La réponse est oui. Ils expliquent ce résultat en s'appuyant sur la théorie écologique de la perception [14], et sur des données expérimentales qui montrent que lorsque perception et action sont découplées, les performances diminuent<sup>17</sup>.

Yarbus disait que « regarder est un aspect de la pensée » [56]. Toutefois, l'essentiel des connaissances provient d'expériences en laboratoire. Des travaux ont montré l'amélioration des performances (prise d'information) avec l'expérience, quelle que soit la tâche envisagée (conduite automobile, examen de radiographie par des experts, etc.). La situation de conduite demande des

<sup>14</sup> CAVE : *Cave Automatic Virtual Environment*.

<sup>15</sup> La problématique est proche de celle de A. Berthoz [3]

<sup>16</sup> HMD : *Head Mounted Display*

<sup>17</sup> Cf. aussi [17], selon qui le jugement et l'action n'utilisent pas les mêmes voies corticales.

ressources cognitives, ce qui diminue le champ visuel [33]. Une étude ancienne de Cohen a cherché à montrer les biais des études de laboratoire par rapport à la conduite réelle, du point de vue de la prise d'information visuelle [5]. Il enregistrait les fixations (nombre, durée) sur les objets significatifs pour la tâche de conduite, d'une part dans une situation de conduite réelle, d'autre part en présentant une photo du site pendant 5 secondes et en demandant aux sujets de « regarder attentivement cette rue, comme si ils allaient devoir tourner dedans » (c'est une petite rue encombrée par une grue). Malgré cette consigne, les gens ne regardent pas la même chose en conduite et devant la photo : la durée des fixations est plus longue en laboratoire, et ils regardent moins les objets pertinents pour la conduite (la durée de fixation est considérée comme un indicateur de la charge mentale [34]). L'auteur conclue qu'en laboratoire, les gens sont moins engagés dans la tâche de conduite, et se demande jusqu'à quel point on peut faire passer le permis à des futurs automobilistes en présentant des diapositives<sup>18</sup>...

Dans un état d'esprit différent, Martens et Fox ont récemment comparé conduite simulée et observation de vidéo routière, en demandant aux sujets de faire « semblant » de conduire [35], méthodologie reprise par [13].

**Acknowledgements** Cette étude bibliographique a été réalisée grâce au concours de la *Fondation Sécurité Routière*, au travers du Projet SICAP.

## Références

- Allen, T.M., Lunenfeld, H., Alexander, G.J. : Driver information needs. *Highway Research Board* **36**, 102–115 (1971)
- Auberlet, J.M., Brémond, R., Désiré, L., Granié, M.A., Mastracci, M., Rabier, R., Tom, A. : The pedestrian as the center of planning : No evaluation without data. In : in Proc. International Conference on Safety and Mobility of Vulnerable Road Users. Jerusalem (2010). (to appear)
- Berthoz, A. : *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris (1997)
- Blue, V.J., Adler, J.L. : Cellular automata micro-simulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B* **35**, 293–312 (2001)
- Cohen, A.S. : Car driver's pattern of eye fixations on the road and in the laboratory. *Perceptual and motor skills* **52**, 515–522 (1981)
- Durgin, F.H., Reed, C., Tigue, C. : Step frequency and perceived self-motion. *ACM Trans. Appl. Percept.* **4**(1), Art. No 5 (2007)
- Endsley, M.R. : Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors* **37**, 32–64 (1995)
- Fajen, B.R., Warren, H.W. : Behavioral dynamics of steering, obstacle avoidance, and route selection. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* **29**, 343–362 (2003)
- Fink, P.W., Foo, P.S., Warren, W.H. : Obstacle avoidance during walking in real and virtual environments. *ACM Trans. Appl. Percept.* **4**(1), Art. No 2 (2007)
- Firth, D.E. : Pedestrian behavior. In : A.J. Chapman, F.M. Wade, H.C. Foot (eds.) *Pedestrian accidents*, pp. 41–69. John Wiley & Sons Ltd (1982)
- Fortenbaugh, F.C., Chaudhury, S., Hicks, J.C., Hao, L., Turano, K.A. : Gender differences in cue preference during path integration in virtual environments. *ACM Trans. Appl. Percept.* **4**(1), Art. No 6 (2007)
- Frenz, H., Lappe, M., Kolesnik, M., Bührmann, T. : Estimation of travel distance from visual motion in virtual environments. *ACM Trans. Appl. Percept.* **4**(1), Art. No 3 (2007)
- Giannopulu, I., Bertin, R., Brémond, R., Espié, S., Kapoula, Z. : Visuomotor strategies using driving simulators in virtual and pre-recorded environment. *Advances in Transportation Studies* **14**, 49–56 (2008)
- Gibson, J.J. : *The ecological approach to visual perception*. Houghton Mifflin, Boston, MA (1979)
- Gibson, J.J., Crooks, L.E. : A theoretical field-analysis of automobile driving. *The American journal of psychology* **51**(3), 453–471 (1938)
- Goffman, E. : *Relations in Public : Microstudies of the Public Order*. Basic Books, New York (1971)
- Goodale, M.A., Milner, A.D. : Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences* **15**(1), 20–25 (1992)
- Granié, M.A. : *L'éducation routière chez l'enfant : évaluation d'actions éducatives*. Tech. Rep. 254, INRETS, Arcueil (2004)
- Helbing, D. : A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians. *Complex Systems* **6**, 391–415 (1992)
- Helbing, D., Molnar, P. : Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review Part E* **51**, 4282–4286 (1995)
- Hoc, J.M. : Towards ecological validity of research in cognitive ergonomics. *Theoretical advances in cognitive ergonomics* **2**(3), 278–288 (2001)
- Hoc, J.M., Amalberti, R. : Diagnostic et prise de décision dans les situations dynamiques. *Psychologie Française* **39**, 177–192 (1994)
- Hoogendoorn, S.P., Bovy, P. : Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B* **38**, 169–190 (2004)
- Hoogendoorn, S.P., Bovy, P.H.L. : Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B* **38**, 169–190 (2004)
- Hugues, R.L. : The flow of human crowds. *Annual review of fluid mechanics* **35**, 169–182 (2003)
- Ishaque, M.M., Noland, R.B. : Behavioural issues in pedestrian speed choice and street crossing behavior : a review. *Transport Review* **28**(1), 61–85 (2008)
- Itti, L., Rees, G., Tsotsos, J.K. : (Ed.) *Neurobiology of attention*. Elsevier (2005)
- Kitazawa, K., Fujiyama, T. : Pedestrian vision and collision avoidance behavior : investigations on the information process space of pedestrians using an eye tracker. In : Proc. PED (2008)

<sup>18</sup> On pourrait également dire que dans la condition de laboratoire, les sujets arrêtent leur « simulation de conduite » au moment correspondant à la photo.

29. Lee, D.N. : The optic flow field : the foundation of vision. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* **290**, 169–179 (1980)
30. Lichtenstein, L., Barabas, J., Woods, R.L., Peli, E. : A feedback-controlled interface for treadmill locomotion in virtual environments. *ACM Trans. Appl. Percept.* **4**(1), Art. No 7 (2007)
31. Lobjois, R., Cavallo, V. : Age-related differences in street-crossing decisions : the effects of vehicle speed and time constraints on gap selection in an estimation task. *Accident Analysis and Prevention* **39**, 934–943 (2007)
32. Lobjois, R., Cavallo, V. : The effects of aging on street-crossing behavior : From estimation to actual crossing. *Accident Analysis and Prevention* **41**, 259–267 (2009)
33. Mackworth, N.H. : Stimulus density limits the useful field of view. In : R.A. Monty, J.W. Senders (eds.) *Eye movements and the higher psychological process*, pp. 307–321. Laurence Erlbaum (1976)
34. Mackworth, N.H., Bruner, J. : How adult and children search and recognize pictures. *Human Development* **13**, 149–177 (1970)
35. Martens, M.H., Fox, M. : Does road familiarity change eye fixations? A comparison between watching a video and real driving. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour* **10**(1), 33–47 (2007)
36. Mohler, B.J., Thompson, W.B., Creem-Regehr, S.H., Willemsen, P., Pick, H.L., Rieser, J.J. : Calibration of locomotion resulting from visual motion in a treadmill-based virtual environment. *ACM Trans. Appl. Percept.* **4**(1), Art. No 4 (2007)
37. Mundutéguy, C., Darses, F. : Perception et anticipation du comportement d'autrui en situation simulée de conduite automobile. *Le Travail Humain* **70**, 1–32 (2007)
38. Norman, D.A., Bobrow, D.G. : On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology* **7**, 44–64 (1975)
39. Oxley, J., Fildes, B., Ihsen, E., Charlton, J., Days, R. : Crossing roads safely : An experimental study of age differences in gap selection by pedestrians. *Accident Analysis and Prevention* **37**, 962–971 (2005)
40. Papadimitriou, E., Yannis, G., Golias, J. : A critical assessment of pedestrian behaviour models. *Transportation Research Part F* **12**(3), 242–255 (2009)
41. Paris, S., Pettré, J., Donikian, S. : Pedestrian reactive navigation for crowds simulations : a predictive approach. In : *Proceedings of Eurographics* (2007)
42. Rabier, R., Brémond, R., Auberlet, J.M. : Un système de prise de vue panoramique bas-coût pour la réalité virtuelle. In : *Actes du congrès de l'Association Française d'Informatique Graphique*, pp. 205–212. Arles (2009)
43. Rasmussen, J. : Skills, rules, and knowledge : signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **13**(3), 257–266 (1983)
44. Seyfried, A., Steffen, B., Lippert, T. : Basics of modelling the pedestrian flow. *Physica* **368A**, 232–238 (2006)
45. Simon, L., Tarel, J.P., Panjo, H., Brémond, R. : A computational model of visual search saliency for road signs diagnostic. *Perception* **38** (supplement), 46 (2009). (abstract of ECVP)
46. Simpson, G., Johnston, L., Richardson, M. : An investigation of road crossing in a virtual environment. *Accident Analysis and Prevention* **35**, 787–796 (2003)
47. Tattegrain-Veste, H., Bellet, T., Pauzié, A., Chapon, A. : Computational driver model in transport engineering : COSMODRIVE. *Transportation Research Record* **1550**, 1–7 (1996)
48. Teknomo, K. : Application of microscopic pedestrian model. *Transportation Research Part F* **9**, 15–27 (2006)
49. Thompson, W.B., Willemsen, P., Gooch, A.A., Creem-Regehr, S.H., Loomis, J.M., Beall, A.C. : Does the quality of the computer graphics matter when judging distances in virtually immersive environments? *Presence* **13**, 560–571 (2004)
50. Thurell, A.E., Pelah, A., Distler, H. : The influence of non-visual signals of walking on the perceived speed of optic flow. *Perception* **27s**, 147 (1998)
51. Tom, A., Auberlet, J.M., Brémond, R. : Approche psychologique de l'activité de traversée de piétons. Implications pour la simulation. *Recherche Transports Sécurité* **101**, 265–279 (2008)
52. te Velde, A.F., Kamp, J.V.D., Barela, J.A., Savelsbergh, G.J.P. : Visual timing and adaptive behavior in a road-crossing simulation study. *Accident Analysis and Prevention* **37**(3), 399–406 (2005)
53. Warren, W.H., Hannon, D.J. : Eye movements and optical flow. *Journal of the Optical Society of America A* **7**, 160–169 (1990)
54. Witmer, B.G., Kline, P.B. : Judging perceived and traversed distance in virtual environments. *Presence* **7**, 144–167 (1998)
55. Wolfe, J.M. : Visual search, pp. 13–74. in Pashler H. (Ed.), *Attention*, Psychology Press Ltd (1998)
56. Yarbus, A.L. : *Eye Movements and Vision*. Plenum, New York (1967)