



Recherche Transports Sécurité 101 (2008) 265–279

Approche psychologique de l'activité de traversée des piétons Implications pour la simulation

Pedestrians crossing: a psychological approach Implications for pedestrian simulation

Ariane Tom^a, Jean-Michel Auberlet^{a, *}, Roland Brémond^b*Adresses professionnelles des auteurs à la date d'acceptation de l'article*^a INRETS-MSIS, 58 Boulevard Lefebvre, 75732 Paris Cedex 15^b LCPC-DESE, 58 Boulevard Lefebvre, 75732 Paris Cedex 15

Reçu le 15 mai 2008 ; accepté le 16 décembre 2008

Résumé

La plupart des modèles de simulation microscopique de piétons ne traitent pas les interactions piétons-véhicules. Ces interactions sont pourtant essentielles lors de la traversée de rue par les piétons, situation qui concentre des enjeux d'aménagement urbain et de sécurité routière. La littérature scientifique fournit plusieurs travaux sur l'activité de traversée de rue, mais aucun qui soit directement transposable en modèle informatique de simulation de piétons. À partir du constat d'un manque de fidélité entre les interactions simulées et les interactions observables dans le monde réel, ainsi que d'un manque de modèle psychologique transposable en modèle de simulation, nous proposons les éléments d'un modèle psychologique du piéton pour des applications routières. Après avoir rappelé les enjeux de l'accidentologie des piétons en ville et en partant d'un recensement des compétences des piétons, nous identifions les lacunes des modèles informatiques actuels, et nous examinons les principaux facteurs psychologiques impliqués dans la prise de décision de traversée de rue. Nous concluons sur les bénéfices qui pourraient être obtenus pour la simulation du trafic urbain de la mise en application des modèles psychologiques cités.

Abstract

Most pedestrian simulation models ignore pedestrian-vehicle interactions. However, these interactions are critical when pedestrians cross the streets. Thus, until now the scientific literature on pedestrian locomotion has not allowed to build a microscopic pedestrian simulation model for street simulation. In view of the disparity between pedestrians as simulated in current models and their observable behaviour, and in view of the fact that the state of the art in pedestrian simulations lacks psychological foundations, we propose a framework for a psychological pedestrian model for street simulation applications. After briefly focusing on pedestrian road safety issues, we provide an overview of pedestrian road crossing skills. We then attempt to find psychological models, both for locomotion and the cognitive and perceptive skills needed for road crossing decisions. In conclusion, we bring together the relevant parts of each of these psychological models, allowing to build a simplified framework of a microscopic pedestrian simulation model.

Mots clés : Piéton ; Traversée de rue ; Compétences ; Perception ; Cognition ; Simulation de trafic

Keywords: Pedestrian; Road crossing; Skills; Perception; Cognition; Traffic simulation

* Auteur correspondant.

Courriel : jean-michel.auberlet@inrets.fr

1. Introduction

Les déplacements piétonniers en milieu urbain ont fait l'objet d'études dans de nombreuses disciplines, en psychologie (Michon & Denis, 2001), (Tom & Denis, 2004), en accidentologie (Julien et Carré, 2002), (Latrémouille *et al.*, 2004), en planification des transports (Fruin, 1971) comme en simulation de flux (Yang *et al.*, 2006). Toutefois, en matière de recueils de données, de modèles de comportement comme d'outils de simulation, ces travaux sont sans commune mesure avec les recherches menées sur les automobilistes (Saad, 1999) (Ranney, 1994), (Shinar, 2007). Pour la simulation du trafic urbain, le développement de modèles de simulation de piétons constitue pourtant un enjeu important pour les applications liées à la sécurité routière et au fonctionnement urbain : aménagement urbain, régulations de feux, simulation de conduite en ville, etc.

Dans certains modèles de simulation de trafic urbain, qui traitent principalement des déplacements des conducteurs, on trouve des interactions piéton/véhicule, par exemple dans VISSIM (Beaird *et al.*, 2006). Dans ces modèles, les piétons sont assimilés à des obstacles (mobiles) ou à une gêne engendrant des retards. C'est le cas également des *queuing models*, qui se concentrent sur les déplacements des véhicules : les piétons sont alors vus comme source de congestion dans la circulation, ou comme source de retards. Dans ces modèles, les compétences du piéton ne sont pas prises en considération. D'un autre côté, dans les modèles de simulation de piétons, on trouve bien la prise en compte de certains aspects du comportement humain (planification, évacuation de foules), mais avec des lacunes dans les situations de traversée de rue. Notre diagnostic est que l'absence de modèle psychologique théorique applicable à la traversée de rue se reflète dans les modèles de simulation, lesquels sont très limités dans la prise en compte des principales composantes (compétences, processus, etc.) mises en œuvre par les piétons lors de cette action.

Il existe pourtant une littérature sur les compétences des piétons, qui montre que le piéton n'est pas réductible à un automate et qui pourrait servir de base à la simulation. Par exemple, dans le cadre de la traversée de rue, Tolmie *et al.* (2002) ont défini quatre compétences qui peuvent être modélisées : la recherche d'un lieu sûr où traverser, la détection de la présence de trafic, le jugement de minutages visuels, enfin la perception des intentions des autres. Ces compétences ne sont pour l'instant pas utilisées dans les modèles de simulation des piétons. Sur la base de ces compétences reconnues, nous cherchons à identifier les modèles psychologiques qui, à différents niveaux, peuvent contribuer à modéliser les comportements des piétons en vue de simuler la traversée de rue.

À partir de la littérature des différentes disciplines concernées par les déplacements piétonniers, nous constatons que ces déplacements ne sont pas toujours aisés à décrire, ni

à comprendre. Par exemple, bien que ne disposant pas de marquage explicite au sol (hors passage piéton), les flux de piétons semblent s'organiser en groupes, voies, respectant un *code de la route* informel qui permet à chacun d'anticiper, donc de prédire le comportement, la trajectoire des autres usagers (Lee et Watson, 1992). Notons que ce contraste entre règles formelles et informelles a été également mis en évidence dans le domaine de la conduite automobile (Björklund & Åberg, 2005). Par ailleurs, de nombreux aspects de la morphologie urbaine et du mobilier urbain entravent le cheminement du piéton, qui s'y adapte. Ces comportements collectifs et adaptatifs doivent être décrits et expliqués pour pouvoir être simulés.

La première partie de l'article vise à montrer la complexité que représente pour les piétons une situation de traversée de rue. L'accidentologie des piétons et le modèle de Firth (1982) qui décompose l'activité de traversée de rue en plusieurs phases illustrent cette complexité. Ceci nous amène à considérer l'activité de traversée de rue par le piéton comme l'enjeu principal des déplacements urbains piétons en termes de sécurité routière. Ensuite, à partir d'une revue de la littérature psychologique sur les compétences des piétons, nous faisons un bilan des principaux modèles de simulation de piétons issus de la littérature scientifique. Le constat est que les modèles de simulation microscopique existant aujourd'hui ne sont pas pertinents dans un contexte de traversée de rue, faute d'un modèle sous-jacent de comportement du piéton. Pour remédier à cette situation, nous recherchons des modèles psychologiques (qualitatifs) pertinents pour décrire les différentes composantes de l'activité de traversée de rue. Cet état des lieux nous paraît constituer un préalable à une compréhension générale de cette activité avant la construction d'un modèle informatique de simulation de piéton. En conclusion, nous proposons une architecture de modèle dédié à la simulation de traversée de rue par des piétons.

2. La traversée de rue : une situation complexe

Les données d'accidentologie montrent que chaque année en France de l'ordre de 800 piétons sont tués et 17 000 blessés (Brenac *et al.*, 2003), chiffre qui tourne autour de 550 tués en 2008. Quatre-vingt-quinze pour cent des accidents corporels impliquant au moins un piéton se produisent en agglomération et occasionnent 82 % des piétons tués. Les populations les plus touchées sont celles des enfants et des personnes âgées (Koepsell *et al.*, 2002). Par ailleurs, 34 % des accidents corporels impliquant au moins un piéton se produisent en intersection. Actuellement moins fréquents qu'en section courante, ces accidents risquent de croître en proportion. En effet, une des pistes possibles pour rendre plus sûrs les déplacements piétons est de retirer les passages piétons sans feux des sections courantes pour les implanter

aux carrefours. D'après Rennesson (2004), [...] leurs traversées seront organisées et localisées en des endroits sûrs, c'est-à-dire presque exclusivement aux carrefours. Ceci permettrait de réguler les flux de trafic (automobile, piéton), mais ferait alors des carrefours des enjeux de sécurité routière encore plus importants.

L'enjeu de sécurité pour les piétons peut être abordé à partir des travaux de Brenac *et al.* (2003), fondés sur une méthode d'élaboration de scénarios types d'accidents de piétons. Ainsi les scénarios types impliquant des piétons traversant ou s'engageant sur la chaussée montrent que les obstructions à la visibilité ou des conditions de visibilité défavorables jouent un rôle tout particulier. D'autres circonstances déterminant des problèmes de mauvaise prise d'information, de capture d'attention, ou d'impossibilité à anticiper sont également dénombrées (Brenac *et al.* 2003).

Ces données ne donnent pas d'information sur la typologie des piétons accidentés. Fontaine et Gourlet (1997) ont effectué une étude approfondie sur la base de 1 289 piétons tués dans des accidents de la route en France, entre mars 1990 et février 1991. Quel que soit l'âge, les hommes sont surreprésentés par rapport aux femmes et les personnes âgées par rapport aux plus jeunes. De plus, la section (*i.e.* le début, le milieu ou la fin de la traversée) où l'accident s'est produit varie avec l'âge du piéton (Fig. 1).

Selon Firth (1982), rejoint en cela par Lassarre *et al.* (2007), parmi les tâches complexes à réaliser par le piéton, la traversée de voies est probablement celle qui est la plus fortement présente dans les statistiques d'accidents. La tâche de traversée est décrite par Firth en trois étapes, dont la deuxième est subdivisée en quatre phases.

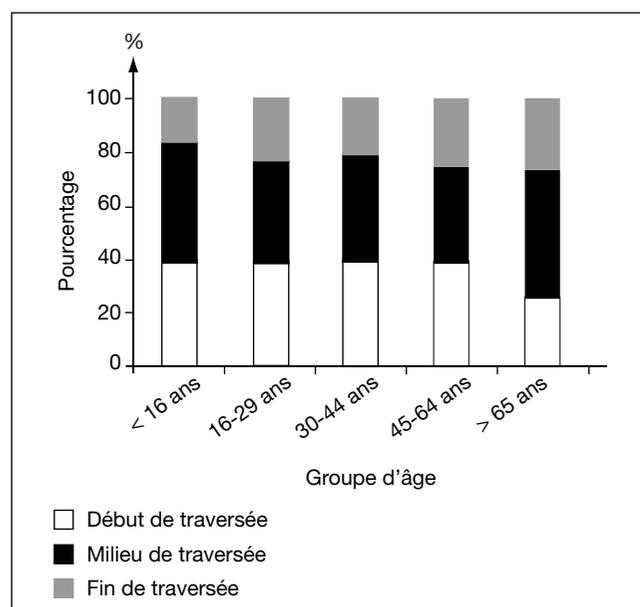


Fig.1 Pourcentages de piétons tués selon le groupe d'âge et la section de la traversée

D'après (Fontaine & Gourlet, 1997).

• Sélection du lieu de traversée : selon Grayson (1975), les adultes semblent choisir un lieu pour traverser. Ce premier stade est à rapprocher aussi de la première compétence mise en évidence par Tolmie *et al.* (2002), voir section 3.

• Sélection du moment de traversée, subdivisé en quatre phases :

– exploration de l'espace visuel ;

– sélection des informations pertinentes, qui alimentent une représentation interne de la situation ;

– appréciation de la situation, fondée sur la représentation actuelle ; des recherches ont montré l'importance des jugements fondés sur la vitesse, la distance, les intervalles temporels entre les véhicules environnants ; l'estimation du temps à l'impact impliquant un certain degré d'anticipation ; de plus, l'âge a un effet fort sur l'estimation des vitesses ;

– décision de traverser ou non la rue, fondée sur la représentation courante situationnelle.

• La traversée de rue (activité motrice). C'est durant cette étape que le piéton doit faire face au risque d'accident.

Grâce à cette décomposition en étapes, nous pouvons apprécier à quel point la tâche de traversée est une tâche complexe, impliquant de nombreux processus de nature perceptivo-cognitive et motrice. Alors même que les piétons représentent un enjeu majeur pour la sécurité routière, particulièrement lors de la traversée, leurs compétences sont peu prises en compte dans les analyses des données d'accidentologie qui, au mieux, considèrent une typologie des piétons (âge, sexe). Nous allons voir que ce manque de connaissance se traduit également, dans les modèles de simulation microscopique de déplacements de piétons, par des lacunes qui ne permettent pas de les utiliser pour des applications au trafic urbain.

3. Compétences des piétons

L'activité de traversée s'apparente à une tâche de résolution de problème pour laquelle les piétons doivent utiliser des compétences spécifiques. Nous les recensons dans cette section.

Dans une situation de traversée, le piéton doit prendre en compte non seulement les autres piétons croisant son chemin, mais aussi et surtout les autres usagers de la route (automobilistes, motocyclistes, etc.). Endsley (1995a, 1995b, 2000) a élaboré une définition de la conscience de la situation qui peut être appliquée à une variété de domaines : [c'est] la perception des éléments de l'environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur statut dans le futur proche. Cette définition inclut trois niveaux interdépendants de la conscience de la situation (perception, compréhension et projection dans le temps). Une fois perçue et comprise, l'information est projetée dans le futur sur la base de modèles mentaux de la situation courante et d'un modèle de sa dynamique. Le plus haut niveau de la conscience de la

situation concerne donc l'anticipation. Bien sûr, les connaissances antérieures et les attentes liées à la tâche en cours et à la situation courante peuvent influencer la conscience de la situation en agissant comme des filtres pour sélectionner un sous-ensemble d'informations jugées pertinentes. Le focus sur les *actions futures* des autres (quatrième compétence dans le modèle de Tolmie *et al.*, 2002) implique que l'anticipation joue un rôle à ce niveau. Le piéton prend en considération toute information pertinente lui permettant de prévoir le futur proche (intentions, mouvements, etc.).

Par ailleurs, Thomson *et al.* (1996) ont mis en évidence quatre habiletés impliquées dans la tâche de traversée de rue. Il s'agit de la détection de la présence de trafic, du jugement des minutages visuels (qui suppose de comparer le temps disponible et le temps nécessaire pour traverser), de la coordination des informations en provenance de différentes directions, enfin de la coordination perception/action. Les mêmes auteurs ont ensuite mis en évidence quatre compétences majeures (Tolmie *et al.*, 2002).

- La première compétence (T1) consiste à trouver des lieux sûrs pour traverser la route ; elle est fondée sur la perception du danger en relation avec la topologie de l'environnement routier (par exemple, les passages piétons).
- La deuxième compétence (T2) est consciente : il s'agit de rechercher les mouvements réels et potentiels des véhicules et d'en tirer les implications pour la traversée de rue. Ceci est réalisé principalement *via* la vision. Cette compétence exige d'isoler tout d'abord les indices auditifs et visuels pertinents liés aux véhicules qui approchent du lieu de conflit potentiel, puis d'écarter (par filtrage) les informations liées aux véhicules qui ne sont pas source potentielle de conflit. Ces compétences de prise d'information et de filtrage nous paraissent revêtir une importance particulière dans une perspective de modélisation.
- La troisième compétence (T3) est le chronométrage des intervalles. Elle requiert d'intégrer des jugements sur trois facteurs : distance et vitesse des véhicules, temps disponible pour traverser et temps nécessaire à la traversée. Il s'agit pour le piéton de coordonner son mouvement avec ceux des véhicules en évaluant les créneaux temporels.
- La quatrième compétence (T4) est la perception des intentions des autres. Ceci implique une interprétation des indices visuels perçus, une projection dans le futur pour anticiper le comportement des autres.

Pour sa part, le sociologue Goffman (1971) souligne que les piétons ne peuvent pas être réduits à des automates et insiste sur la dimension sociale de la marche urbaine en considérant les piétons comme des *unités de la participation*, quelquefois seuls, quelquefois en groupe. Les piétons qui sont perçus comme membres d'un ensemble tirent avantage des privilèges de la circulation en groupe, alors que les piétons seuls sont plus exposés aux contacts et aux regards. Selon Goffman, pour éviter toute collision lors de ses déambulations urbaines, le piéton emploie trois compétences.

- L'externalisation ou *glose corporelle* (G1) : c'est le processus par lequel le piéton rend ses intentions lisibles aux autres piétons, ceci par une gestuelle appropriée. C'est un processus non conscient qui permet, selon Hoogendoorn et Bovy (2002), d'estimer le comportement futur des autres piétons et donc de l'anticiper.
- Le balayage visuel (G2) : il s'agit d'effectuer un ensemble de mouvements oculaires afin de mettre à jour les positions relatives des autres piétons situés devant ou sur le côté (actualisation de soi et d'autrui dans une représentation spatiale). Cette compétence est à rapprocher de la seconde compétence décrite par Tolmie *et al.* (2002), mais envisagée de manière plus active : il s'agit ici de regarder plus que de voir. La zone de balayage, ovale allongé vers l'avant, change constamment en fonction de la densité de trafic aux alentours. Ceci permet à Hoogendoorn et Bovy (2002) de décrire les piétons comme des particules anisotropes.
- La minimisation des ajustements (G3) : elle permet de créer une zone de sécurité autour de soi.

Enfin, Granié (2004) distingue six types de savoirs et savoir-faire pour le déplacement des piétons, en lien avec la sécurité routière. Ils sont présentés dans le tableau 1 et sont mis en relation avec ceux déjà identifiés par Tolmie *et al.* (2002) et Goffman (1971).

Dans la suite de cet article, nous nous concentrons sur les deux premières compétences au sens de Granié, à savoir les compétences perceptives et cognitives. En effet, dans la décision de traversée de rue, les facteurs métacognitifs, affectifs et sociaux sont plutôt des déterminants de la variabilité interindividuelle, qui sont secondaires au regard de notre objectif de simuler la décision de traversée de façon générique, ce qui n'est pas encore réalisé. En outre, nous n'abordons pas non plus les compétences psychomotrices qui concernent l'activité de traversée proprement dite, soit une fois la décision prise.

Tableau 1
Comparaison des compétences des piétons selon Tolmie *et al.* (2002), Goffman (1971) et Granié (2004)

Compétences			Exemples
Tolmie <i>et al.</i> , 2002	Goffman, 1971	Granié, 2004	
T2	G2	Perceptives	Perception des vitesses, des distances et des formes
T4	G1	Cognitives	Capacités d'anticipation
		Métacognitives	Connaissances de ses propres limites perceptives et motrices
		Affectives	Estime de soi
	G1	Sociales	Relation à la règle
T3	G3	Psychomotrices	Contrôle des mouvements

4. Modèles microscopiques de simulation des piétons

Nous examinons dans cette section les principales compétences permettant d'effectuer la traversée de rue par des piétons du point de vue des modèles de simulation microscopique qui intègrent des modèles de comportement individuel et d'interaction, faisant émerger un comportement collectif au niveau d'une population (e.g. une *foule*). Les besoins pour la simulation de traversée de rue concernent principalement la prise en compte des interactions piétons/conducteurs et de l'anticipation.

Nous rapportons de quelle manière sont pris en compte les piétons dans cinq des principaux modèles récents et dans quelle mesure sont prises en compte l'hétérogénéité et l'anticipation qui caractérisent la traversée de rue, celle-ci mettant en présence deux types d'usagers, les piétons et les conducteurs. Nous verrons que ces modèles de simulation se concentrent sur l'évaluation du design de l'environnement (tels que les sorties de secours) ou sur les flux de piétons.

4.1. Modèle à base d'automates cellulaires de Blue et Adler

Dans les modèles d'automates cellulaires, comme celui de (Blue & Adler, 2000), l'espace est subdivisé selon une grille 2D de cellules. Les mouvements pédestres s'effectuent en *sautant* d'une cellule à une autre et en changeant de voie si nécessaire. Le piéton avance selon un ensemble de règles censées guider la marche normale le long d'un chemin. Dans le modèle de Blue et Adler (2000), la micro-simulation procède par pas de temps. Les voies assignées et la mise à jour des vitesses modifient les emplacements des piétons à chaque pas de temps. Cela se fait en plusieurs étapes, en parallèle sur tout le réseau.

- Voies assignées: le piéton est assigné à la voie la plus dégagée, celle qui présente l'intervalle maximal, c'est-à-dire la voie avec le maximum de cellules vides devant lui.
- Déplacement dans la voie avec :
 - assignation des vitesses de marche, selon l'intervalle disponible dans la voie ;
 - mouvement vers l'avant, limité par la contrainte d'un *champ de vue*, vers l'avant, restreint à huit cellules.

D'après Teknomo (2002), ce modèle a l'avantage d'être simple à développer et rapide à mettre à jour. Toutefois, le comportement du piéton n'est pas reflété correctement car la locomotion simulée n'est pas continue. En outre, il n'est pas tenu compte pour le mouvement piéton de l'influence des autres piétons (*a fortiori* des conducteurs), c'est-à-dire de leur intention de déplacement sur la grille. En conséquence, l'anticipation, qui est une étape importante dans la locomotion (Gibson & Crooks, 1938), (Auberlet, 2007), (Auberlet & Brémond, 2008), n'est pas intégrée au modèle.

4.2. Modèle de forces sociales de Helbing et Molnár

Helbing et Molnár (1995) ont décrit un modèle dans lequel le déplacement des piétons est sous le contrôle de forces sociales qui représentent l'effet de l'environnement sur leur comportement. L'accélération est induite par la somme de ces forces et la vitesse désirée dépend de la motivation à atteindre la destination. La destination n'est pas réduite à un point : c'est une porte ou une zone. Le piéton chemine habituellement en ligne droite. Ses mouvements sont influencés par ceux des autres de telle manière que, pour les éviter, il doit maintenir autour de lui une sphère privée (Goffman, 1971). Pour ce faire, il prend en compte deux facteurs, qui sont la densité de piétons autour de lui et la vitesse désirée. Le piéton peut également être attiré par d'autres piétons, ces effets d'attraction conduisant à la formation de groupes (cohésion sociale). Au-delà des interactions entre piétons, les interactions avec les obstacles physiques sont aussi prises en compte : les murs par exemple produisent un effet répulsif. Dans ce modèle, les variables ont une signification psychologique ou physique.

Teknomo (2002) considère que la principale qualité de ce modèle est que les variables ne sont pas arbitraires et ont une signification physique. Néanmoins, le modèle prend peu en considération la notion d'anticipation. En effet, les lignes de potentiel émises depuis les obstacles peuvent certes influencer les mouvements des piétons, créant une anticipation spatiale limitée, mais l'anticipation temporelle n'est pas représentée. Seuls sont modélisés des *clichés* successifs du comportement du piéton. De plus, il n'y a pas d'attentes relatives aux mouvements et intentions des autres : ainsi, en cas de risque de collision avec un autre piéton, ce n'est qu'au dernier moment que les piétons s'écartent l'un de l'autre. La vie courante nous montre que ce n'est en général pas le cas, les piétons anticipant les comportements d'autrui. Ce modèle semble plus à même de simuler des foules que des comportements individualisés. Pour notre propos, il souffre d'une grande limitation, en ce qu'il ne décrit pas les interactions des piétons avec les véhicules.

4.3. Modèle du flux de piétons de Hoogendoorn

Ce modèle s'articule en deux composantes (Hoogendoorn & Bovy, 2002, 2004), (Hoogendoorn *et al.*, 2007).

- Un modèle physique représente l'effet de forces physiques appliquées aux piétons, par exemple lors d'une collision. Les piétons sont perçus comme des particules anisotropes et compressibles, qui réagissent aux stimuli localisés devant eux. Deux types de forces agissent sur les piétons, les forces tangentielles et normales.
- Un modèle de contrôle représente les décisions que les piétons prennent, notamment en matière d'accélération et de changement de direction.

Ce modèle inclut une théorie normative du comportement pédestre dans un espace continu : quelle que soit l'action du piéton, il cherche à optimiser une fonction d'utilité. Le modèle de Hoogendoorn suppose que les piétons anticipent un comportement coopératif de la part d'autres piétons. D'après les auteurs, la coopération résulte de l'externalisation (Goffman, 1971). Si ce modèle considère bien la notion d'anticipation, elle n'est cependant pas centrale et elle est toujours orientée vers la coopération et n'envisage pas le conflit. De plus ce modèle ne décrit pas les interactions avec les véhicules.

4.4. Modèle de simulation microscopique du piéton de Teknomo

Teknomo (2006) a proposé un Modèle de simulation microscopique du piéton (MSMP). Chaque piéton est décrit par sa localisation, sa vitesse, et par une destination cible (prédéterminée). Il est conçu comme un individu qui se déplace dans un espace plan. Le modèle simule les mouvements du piéton sur la base d'un modèle de forces qui représentent les obstacles et la motivation à atteindre la destination. Il en existe deux sortes : les forces vers l'avant et les forces répulsives. En l'absence d'autres piétons, seule s'exerce la force vers l'avant, permettant au piéton d'atteindre sa destination. En revanche, si d'autres piétons sont présents dans la zone, alors deux forces répulsives s'opposent à cette force vers l'avant. La première modélise le dépassement et les rencontres entre piétons ; la seconde écarte le piéton de ses voisins, évitant les collisions.

L'intérêt majeur de ce modèle est qu'il a été étalonné et validé sur des données écologiques. Les applications sont nombreuses, comme les flux de piétons uni- et bidirectionnels, ou encore les traversées de voies avec feux. Néanmoins, la notion d'anticipation n'est pas développée dans ce modèle qui reste réactif, de type stimulus-réponse. De plus, ce modèle ne décrit pas les interactions avec les véhicules, interactions fondamentales car le piéton en ville évolue dans un environnement hétérogène comprenant à la fois d'autres piétons et des véhicules.

4.5. Modèle de foule de Paris, Pettré et Donikian

Le modèle de foule proposé par Paris *et al.* (2007) décrit, comme les précédents, les piétons comme des entités autonomes, ici au sein d'un système multi-agent, formalisme revendiqué par les auteurs. L'accent est mis sur l'anticipation des déplacements des autres agents (à partir d'une extrapolation du déplacement actuel) pour calculer une trajectoire en évitant des collisions.

Cependant, ce modèle ne décrit pas les interactions avec les véhicules et ne semble donc pas adapté à la traversée de rue. En effet, cette dernière activité est de nature hétérogène : au moment de traverser une voie, en présence de trafic, le piéton est placé face à des obstacles mouvants et

potentiellement source de danger. La manière dont ce modèle prend en compte l'anticipation en prolongeant à l'infini le comportement actuel des autres piétons n'autoriserait pas une transposition directe à une situation routière, car il ne permet pas de tenir compte d'indices aussi significatifs que les clignotants des véhicules, les feux tricolores, etc.

4.6. Synthèse

De l'examen de ces modèles nous pouvons conclure qu'ils reposent plus sur des analogies aux modèles psychologiques que sur des modèles directement issus de la recherche en psychologie. Ils utilisent pour la plupart des données statistiques en vue de leur *calibration*. L'anticipation est parfois mentionnée, mais, lorsqu'elle est prise en compte, c'est de manière très simpliste (projection dans le futur du comportement actuel). Ces modèles ont été développés pour des déplacements dans des espaces précis comme les couloirs, stades, gares, etc. ce qui fait qu'ils ne traitent pas des interactions véhicules/piétons et que leur transposition à la simulation des déplacements de piétons en carrefour paraît difficile. Le principe de base de ces modèles est la boucle standard de la psychologie cognitive : perception-décision-action. La décision s'effectue sur la base d'une *représentation* implicite de l'environnement et d'un calcul *rationnel* (optimisation) ; l'action se traduit par les mouvements du piéton. Les compétences citées dans le tableau 1 sont soit absentes, soit traitées d'une manière trop lacunaire pour qu'on puisse en attendre un modèle prédictif du comportement de traversée. Par exemple, la plupart de ces modèles informatiques assimilent le piéton à une sphère transparente et omnisciente : chaque piéton voit la totalité de ce qui l'entoure (cette perception est limitée dans l'espace dans les modèles cellulaires).

Avant de recenser les principaux facteurs relevant des compétences perceptives et cognitives (section 6), nous examinons dans ce qui suit trois modèles psychologiques du comportement susceptibles de contribuer à la modélisation des piétons.

5. Approche comportementale pour la locomotion

Lors de la locomotion, une *activité* fondamentale des piétons est l'évitement des obstacles ; ceci a été largement développé par Goffman (1971), qui soutient que le piéton peut être considéré comme une unité véhiculaire, composée d'une coque molle et exposée (l'enveloppe corporelle) que contrôle un *pilote* ou *navigateur* humain. On peut rapprocher cette conception de celle de Hills (1980), pour qui le piéton est le *pilote d'un véhicule très spécial*, à savoir ses jambes. De ce point de vue, la tâche du conducteur et celle du piéton sont comparables, comme le font également observer Gibson et Crooks (1938), Reason (1990) ou Hoogendoorn et Bovy (2002).

La quasi-absence de modèle spécifique du comportement piéton dans son activité de déplacement — à l'exception notable de ceux de Goffman (1971) et de Firth (1982) — nous a conduit à nous intéresser à des modèles psychologiques qui sont largement utilisés dans le cadre de la conduite automobile, pour voir dans quelle mesure ils sont transposables à la situation du piéton. C'est dans cette optique que nous avons examiné trois modèles classiques, qui ont historiquement une grande importance dans la modélisation de la conduite automobile, mais dont les principes dépassent ce domaine particulier pour contribuer à la compréhension de la locomotion en général, en particulier celle du piéton.

5.1. Le modèle d'Allen

Dans le modèle d'Allen *et al.*, (1971), parfois attribué à Michon (1985) comme dans (Ranney, 1994), l'activité de conduite automobile est décrite à partir de trois niveaux d'activité :

- le niveau stratégique, relatif à la planification de l'itinéraire et à la tâche de navigation ;
- le niveau tactique, qui regroupe les diverses actions à court terme comme l'évitement d'obstacles, le dépassement, le choix de la distance intervéhiculaire ou encore le choix de la vitesse ;
- le niveau opérationnel, où sont mises en œuvre des actions sélectionnées au niveau tactique (exécution de la manœuvre).

Ce cadre d'analyse est susceptible d'être transposé au piéton confronté à une tâche de déplacement incluant une traversée de rue. Le niveau stratégique serait relatif au choix de l'itinéraire. Le niveau tactique serait subdivisé en deux aspects : choisir où traverser, et choisir quand (Tolmie *et al.*, 2002). Enfin, le niveau opérationnel comprendrait la séquence motrice à mettre en œuvre pour traverser, ainsi que le contrôle attentionnel qui permet de réagir à une situation inattendue lors de la traversée. Les compétences nécessaires à la traversée concernent principalement le niveau tactique.

La transposition du niveau tactique aux compétences des piétons, au sens de (Granié, 2004), prend en compte principalement les compétences perceptives et cognitives, mais également les compétences métacognitives et sociales. Pour notre part, nous considérons ces deux derniers aspects comme des modulateurs et ne les prenons pas en compte dans un modèle simplifié, dans un souci de limiter le nombre de variables et de paramètres.

5.2. Le modèle d'Endsley

Endsley (1995a, 1995b) propose un modèle relatif à la conscience de la situation (*situation awareness*). Dans ce modèle, l'opérateur humain est décrit comme devant faire face à des systèmes complexes et dynamiques. Il s'agit d'un modèle classique de psychologie cognitive utilisant la bou-

cle perception-décision-action. Le processus dynamique est décrit par une recherche d'informations pertinentes, une interprétation de ces dernières, puis une prise de décision. Trois niveaux sont décrits :

- la perception des entrées sensorielles congruentes pour la tâche en cours dans un temps et un espace donnés, permettant de créer une image mentale de celle-ci ;
- la compréhension des informations sélectionnées et de leurs relations ;
- la projection mentale du statut futur des informations (anticipation).

L'opérateur humain construit sa conscience de la situation à partir d'informations extérieures perçues et à partir de connaissances de long terme conservées en mémoire.

Ce modèle a été utilisé pour la conduite automobile, par exemple par Bellet et Tattegrain-Veste (1999). On peut le décrire comme un modèle des processus attentionnels mis en œuvre pour réaliser une tâche dynamique, restreint aux compétences perceptives et cognitives. Il peut manifestement s'appliquer au déplacement d'un piéton. En particulier, il paraît pertinent pour structurer (implémenter) le niveau tactique décrit dans le modèle d'Allen *et al.* (1971).

5.3. Le modèle de Gibson et Crooks

Pour Gibson et Crooks (1938), la conduite est un cas particulier de la locomotion, effectuée par le biais d'un outil (le véhicule). Quand des obstacles sont perçus, une modification appropriée du comportement est nécessaire pour les éviter. Le champ visuel est sélectif, les éléments pertinents étant saillants, tandis que les éléments non pertinents restent en arrière-plan.

Les auteurs définissent le champ de déplacement sûr (*field of safe travel*) comme l'ensemble des trajectoires que le conducteur peut suivre sans danger. Ce champ a une valence positive, surtout dans sa partie médiane. Il est subjectif, n'est pas fixe mais lié au repère du véhicule, et évolue en fonction de l'environnement tel qu'il est perçu (route, obstacles, autres usagers). La conduite est décrite comme une série de réactions gouvernées perceptivement par le conducteur de manière à garder le véhicule au milieu du champ de déplacement sûr. Plusieurs types de facteurs limitant ce champ sont cités. En matière de visibilité ce sont la limite d'acuité diurne ; la limite de l'éclairage nocturne par les feux du véhicule ; la dégradation de la vision par les intempéries (pluie, brouillard, neige, etc.) ; l'éblouissement par les feux d'autres véhicules ; enfin, le masquage physique (horizon masqué par une colline, carrefour masqué par un poids lourd).

Les obstacles sont décrits par des lignes de potentiel négatif (les *clearance lines*, sorte de halos de valence négative entourant les obstacles) qui modifient le champ de déplacement sûr. Les auteurs distinguent les obstacles en mouvement, pour qui les *clearance lines* émettent depuis le point d'impact potentiel (plus le mouvement de l'obstacle est imprévisible, plus ces

lignes sont étendues), des obstacles potentiels non visibles, derrière un *mur* de brouillard par exemple, et des obstacles légaux, par exemple un feu rouge ou un policier.

Ces concepts peuvent s'appliquer aux piétons, puisque le cadre de cette description est la locomotion en général. Du point de vue des compétences, on peut voir ce modèle comme centré sur les compétences perceptives et anticipatrices. Il peut s'articuler avec celui d'Endsley, dans la mesure où il est fondé sur les mêmes compétences, tout en étant plus général et moins opérationnel. Son principe peut être rapproché également de la notion de champ de forces décrite par Helbing et Molnár (1995), bien qu'il soit plus riche que celle-ci.

5.4. Synthèse

Les trois modèles de l'activité de conduite que nous venons de décrire semblent en partie transposables aux piétons et il est possible de s'en inspirer pour notre objectif de modéliser le comportement des piétons dans leur activité de traversée de rue. En nous appuyant sur les distinctions existant dans le modèle d'Allen *et al.* (1971), nous allons recenser les principaux facteurs psychologiques impliqués dans le choix du moment de traversée, qui se situe au niveau tactique du déplacement. Le problème recouvre deux aspects : à partir de quelles informations et en fonction de quelles contraintes un piéton prend-il la décision de traverser ? Pour tenter de répondre à ces questions, nous examinons tout d'abord les compétences perceptives, puis les compétences cognitives, que nous classons au préalable dans deux grandes catégories relatives à l'anticipation et à l'attention.

6. Compétences cognitivo-perceptives

6.1. La perception

On range sous cette appellation l'ensemble des facteurs liés aux données sensorielles qui ont un impact sur la saillance et la visibilité des différents objets et acteurs dans l'environnement du piéton. Parmi les processus perceptifs, la vision et l'audition sont prépondérantes dans la problématique de la marche, aussi bien pour le conducteur que pour le piéton. En effet, la perception mutuelle des usagers est essentielle, puisque les automobilistes comme les piétons doivent percevoir clairement les mouvements des autres afin d'évaluer les conditions de leurs propres mouvements. Hills (1980) indique que l'essentiel de l'information sensorielle du conducteur est visuelle, proportion qui reste difficile à chiffrer (Sivak, 1996). Dans la tâche de traversée de rue, Oxley *et al.* (1995) identifient des capacités visuelles fondamentales : l'acuité visuelle, la sensibilité au contraste, l'étendue du champ visuel, le traitement des informations visuelles, la perception de la profondeur et du mouvement. L'audition est

également sollicitée, pour localiser les sons et donc pour identifier la direction d'approche des véhicules. Dans ce qui suit, nous nous centrerons sur les processus visuels.

La saillance visuelle des objets, des véhicules, des autres piétons, etc. correspond à la propension d'un objet à attirer l'attention. Elle dépend à la fois d'une sélection ascendante de l'information visuelle (Itti, 2001) et de biais liés à la tâche en cours, aux connaissances *a priori* (Knudsen, 2007). Si on se réfère aux aspects purement ascendants, l'attention visuelle peut être attirée par une variation locale d'une caractéristique visuelle, qui peut être le contraste de luminance entre un objet et le fond proche, la variation d'orientation, le contraste coloré, le mouvement, etc. Plus le contraste avec le fond est marqué, plus la saillance est forte (Wolfe & Horowitz, 2004). Langham et Moberly (2003) et Hills (1980) retrouvent des facteurs similaires dans le contexte de la conduite pour moduler la saillance d'un objet : la taille apparente de l'objet, le contraste entre l'objet et le fond (Blackwell, 1946), le niveau lumineux (la sensibilité au contraste diminue avec la lumière), la présence de sources éblouissantes créant un voile lumineux (Vos, 1984), le contraste coloré (Gegenfurtner & Kiper, 2003). À ces facteurs, il faut ajouter la complexité du fond sur lequel se détache la cible, que l'on peut décrire en termes de masquage visuel (Legge & Foley, 1980). Par exemple, Paulmier *et al.* (2001) ont montré que cette complexité affectait la capacité à détecter un piéton : plus elle est forte, plus le contraste doit être important pour détecter la cible.

Langham et Moberly (2003) suggèrent qu'une des raisons pour lesquelles le taux de piétons accidentés/tués est si élevé est qu'ils font preuve d'une faible saillance pour l'automobiliste, ce qui doit être compris non seulement en termes ascendants mais aussi en termes de biais attentionnels liés à la tâche de conduite pour les automobilistes. Endsley (1995a) cite de nombreuses études montrant que la connaissance *a priori* des caractéristiques des objets peut faciliter leur perception. Le piéton adulte a une expérience répétée de traversée de rue et a donc développé des attentes à ce sujet. La conscience de la situation est guidée par des processus descendants (buts et attentes) associés aux processus ascendants (les indices saillants activent des buts appropriés). Au niveau de la perception, il peut y avoir des erreurs dans la conscience de la situation. Par exemple, un piéton rate une information importante à cause du manque de visibilité. De même, de fausses perceptions peuvent découler d'attentes erronées (Endsley, 1995b).

6.2. L'attention

Du point de vue des neurosciences, Knudsen (2007) décrit trois composantes majeures dans les processus attentionnels :

- la sélection des caractéristiques saillantes dans les données sensorielles (processus ascendant) ;

- les biais dans la sélection des caractéristiques qui auront accès aux ressources, comme la mémoire, biais liés à la tâche en cours, à des connaissances *a priori*, à des états internes, etc. (processus descendants) ;
- la compétition entre les données sélectionnées pour l'accès aux ressources, que l'on peut assimiler au focus attentionnel.

Ce modèle de l'attention permet d'examiner les différentes composantes qui vont contribuer à la sélection de l'information pertinente pour le piéton. En effet, celui-ci se situe dans une tâche particulière et les stimuli plus ou moins saillants de son environnement sont fortement biaisés par la tâche en cours et par les motivations associées (e.g. aller de l'autre côté de la route ; ne pas se faire écraser ; contrôler qu'un enfant ne se fait pas écraser). Notons que les processus ascendants correspondent à des compétences perceptives, alors que les processus descendants correspondent à des compétences cognitives. Les processus purement perceptifs sont de l'ordre de l'extraction d'information à partir des données sensorielles, essentiellement visuelles dans le cas du piéton. La modélisation de ces processus implique de connaître les facteurs principaux (saillance visuelle, vision) et de quantifier ce qui peut l'être.

D'après Prevost (2002), dans les tâches de navigation, la priorité est donnée au contrôle de la direction du regard dans la direction de la marche pour faciliter le traitement de l'information et le guidage vers la destination. Cette anticipation fournit de l'information pour diriger la marche. Pour cet auteur, la perception est donc une capacité clé dans la locomotion, comme c'était déjà le cas pour Gibson et Crooks (1938). Il ne s'agit pas ici seulement de vision, mais du contrôle descendant de la vision en fonction des buts de la tâche en cours (le guidage). On voit ici l'imbrication, dans les processus psychologiques réels, de l'anticipation avec la prise d'information, des compétences cognitives avec les compétences perceptives.

La prise d'information par le piéton (ou par l'automobiliste) dépend de la sélection spatiale des informations, autrement dit du focus de l'attention. L'attention possède une propriété sélective et influe sur le contenu des représentations cognitives sur lesquelles elle porte (James, 1890). Posner (1980) distingue deux régions de l'espace pour l'attention visuo-spatiale : une zone de *bénéfice attentionnel*, qui est comme éclairée par un faisceau de taille fixe où l'information est rehaussée, où les décisions sont plus efficaces et les temps de réaction plus courts ; et une zone qui englobe des régions périphériques inhibées et implique donc un coût attentionnel fort.

Selon Camus (2003), l'attention permet de surmonter la limitation des ressources cognitives et d'intégrer des informations indépendantes. Simons (1999) et O'Reagan *et al.* (2000) ont mis en évidence les phénomènes de *cécité au changement* et de *cécité attentionnelle*. L'attention est portée sur les éléments pertinents pour la tâche en cours, ce qui peut

conduire, en situation de conduite, à l'erreur du *regarde, mais ne voit pas*, qui est une cause d'accident (Hills, 1980). Ces notions attirent l'attention sur les propriétés que l'on peut envisager d'intégrer à un modèle de piétons : la capacité à rendre compte des *erreurs* (d'attention, de prise ou de traitement d'information, d'anticipation). On retiendra alors que le choix du focus attentionnel (où est-ce que je regarde ?) est à la fois lié à l'environnement (stimuli saillants), à la tâche en cours (sélection d'éléments pertinents) et à des états internes (motivations, rapport à la règle, etc.).

Pour être informé d'une situation, un piéton souhaitant traverser une route doit percevoir *le statut, les attributs et la dynamique des éléments pertinents dans l'environnement* (Endsley, 1995a). Les personnes (piétons ou conducteurs) doivent rassembler des informations sur deux séries de paramètres : d'une part l'emplacement des obstacles (fixes et mobiles), d'autre part la dynamique des mobiles. Naturellement, ils tiennent compte de leur propre statut (piéton ou conducteur) et de leurs capacités dynamiques. Ce troisième point est de l'ordre de la connaissance de soi, donc métacognitif.

6.3. L'anticipation

Nous ne prétendons pas donner une définition unique de l'*anticipation*, notion qui existe dans de nombreux domaines de connaissance. Dans ce qui suit, nous examinons son usage en psychologie et en informatique dans la perspective d'une modélisation du piéton prenant en compte cette compétence.

6.3.1. L'anticipation en psychologie

Gibbs (1954) a été l'un des premiers à donner une définition de l'anticipation, dans une perspective de psychologie cognitive. Il la définit comme un processus d'extrapolation des données sensorielles vers un état physique futur. Stadulis (1972) a proposé le terme d'*anticipation-coïncidence* en psychologie du sport d'une manière qui peut être transposée aux piétons. Cette notion s'appuie sur deux aspects : en premier lieu, réaliser une séquence motrice au moment où un objet en mouvement arrive au point d'interception (coïncidence), en second lieu, répondre avant que le mobile n'arrive au point d'interception, en minimisant le retard dû au temps de réaction (anticipation). L'anticipation repose sur une prédiction temporelle et spatiale. Si l'on transpose ces concepts aux piétons, le mobile sera un autre piéton ou un véhicule, et le point d'interception sera le lieu de la collision potentielle.

Récemment, la notion d'anticipation a été étudiée dans le contexte de la conduite automobile (Mundutéguy et Darses, 2007). Le cadre théorique de ce travail peut être transposé à l'étude des piétons. Les automobilistes infèrent le comportement futur d'autres conducteurs à travers l'évocation de stéréotypes activés par des indices, comme la vitesse. La

compréhension des actions des autres est influencée par ces stéréotypes et permet d'anticiper leur comportement. Pour ces auteurs, les prédictions utilisent des indices venant de connaissances permanentes (lesquelles sont fondées sur des stéréotypes) et de données occurrentes (relatives aux caractéristiques de l'environnement). Les conducteurs essaient de calquer les indices attendus sur ceux qui sont présents. Les stéréotypes (schémas) biaisent la perception vers l'information attendue (Riegler, 2001). La représentation mentale de la situation est transitoire et dynamique. Connaissances permanentes et données perçues contribuent ensemble aux indices qui permettent d'anticiper le comportement des autres. Même si les données expérimentales montrent une grande variabilité quant au type d'indice utilisé, elles convergent pourtant sur les mêmes prédictions d'action.

L'anticipation est donc pour les psychologues une extrapolation temporelle et spatiale, fondée à la fois sur l'information occurrente (perception) et sur les connaissances permanentes. Pour les piétons, l'information perceptive est principalement visuelle.

6.3.2. L'anticipation en informatique

Dans le champ de l'intelligence artificielle, Butz *et al.* (2003) distinguent quatre catégories de systèmes anticipateurs selon le niveau d'anticipation. Le premier niveau (anticipation implicite) signifie qu'un comportement est programmé pour répondre à certains objectifs. Par exemple, un code génétique est programmé implicitement par l'évolution pour la survie des espèces. Le deuxième niveau (anticipations *pay-off*) exprime que le gain d'une action est évalué et qu'une décision d'action est prise en conséquence. Le troisième niveau (anticipation sensorielle) influence le traitement sensoriel dû aux prédictions et aux attentes. Dans le quatrième niveau (l'anticipation-état), le système utilise une représentation explicite des états à venir et les prédictions influencent directement la prise de décision.

En informatique, Doniec (2006) a proposé une définition de l'anticipation proche de celle que Rosen a développée pour le domaine biologique. Rosen (1985) considère qu'un système anticipateur contient un modèle prédictif de lui-même et/ou de son environnement, qui lui permet de changer son état courant en fonction d'un ensemble de prédictions. De même, Doniec (2006) voit l'anticipation pour une entité artificielle comme un processus de *raisonnement* en deux étapes : la prédiction de l'état futur du système et l'analyse qui en est faite permettent à l'entité d'adapter son comportement. Nous pensons possible de généraliser cette définition, en disant que les prédictions ne concernent pas seulement l'entité courante, mais aussi les autres entités.

Doniec (2006) a également montré la pertinence pour prendre en compte l'anticipation de Systèmes Multi-Agent (SMA) (Ferber, 1995) centrés sur les agents en mouvement. En ce qui concerne les SMA adaptatifs, Davidsson (2003) a

utilisé l'anticipation préventive, qui revient pour les agents à adapter leur comportement de manière à éviter des situations non désirées. Son modèle est subdivisé en quatre modules interdépendants.

- Les senseurs reçoivent de l'information de l'environnement (perception).
- Le réacteur effectue des tâches routinières sur une base réactive (décision).
- La couche d'anticipation comprend le modèle du monde et de l'anticipateur. Ce dernier simule le futur. Le réacteur peut être modifié en fonction de la valeur du prédicteur (représentation).
- Les effecteurs exécutent les actions (action).

Pour les informaticiens, l'anticipation signifie donc qu'un système réalise une prédiction d'états futurs et adapte (si nécessaire, selon le but courant) son comportement. On remarque l'aspect égocentré de cette approche, *i.e.*, l'entité courante anticipe sur ses propres états futurs sans tenir compte des états futurs des autres entités, que l'on pourrait assimiler à des intentions.

6.4. Synthèse

Dans une tâche de traversée de rue, c'est l'attention visuo-spatiale du piéton qui est prépondérante. La notion de représentation mentale est fondamentale pour la prise en compte de l'activité de traversée, notamment comme prérequis pour anticiper les comportements d'autrui. Elle est au centre du modèle de diagnostic de Hoc et Amalberti (1994). Elle est assistée à la fois par des processus automatiques et par des connaissances générales. C'est leur caractère adaptatif et dynamique qui nous intéresse, notamment le fait qu'elles peuvent changer de contenu pour rester en adéquation avec les changements de l'environnement. Il y a évocation ou construction d'une représentation (sub)symbolique qui permet au sujet d'accéder instantanément à ses connaissances procédurales (Hoc et Amalberti, 1994). Or, dans la situation de traversée de rue, une variable fondamentale est le temps : la tâche de traversée se réalise fréquemment sous pression temporelle. La représentation mentale de la situation à un instant donné perd de sa pertinence si elle n'est pas mise à jour. Une composante importante de la tâche de traversée consiste à garder, au cours du temps, une représentation mentale stable et cohérente de la situation (Endsley, 1995a, 1995b) en vue de la décision d'action.

Par ailleurs, nous n'avons pas trouvé de travaux où la saillance visuelle était abordée du point de vue du piéton. On peut en revanche associer la visibilité des véhicules et le comportement du piéton à travers quelques paramètres :

- la vitesse des véhicules, où plutôt l'évaluation qui en est faite par le piéton ; ceci peut être rapproché des obstacles en mouvement définis par Gibson et Crooks (1938) pour lesquels les *clearance lines*, qui composent le champ de déplacement sûr, émettent depuis le point d'impact estimé ;

l'évaluation de la vitesse des mobiles est un processus automatisé et non conscient, dont l'exécution est très rapide ;

- l'estimation du gap, c'est-à-dire de la distance intervéhiculaire permettant de traverser (e.g. (Oxley *et al.*, 1995), (Lobjois & Cavallo, 2007)) ;
- le temps de traversée, tel qu'il est estimé par le piéton lui-même, qui influe sur sa décision de traverser ; il semble que le jugement du créneau suffisant pour traverser s'appuie sur les distances intervéhiculaires plutôt que sur la vitesse (Simpson *et al.*, 2003).

7. Vers un modèle de piéton pour la simulation

Nous avons souligné l'importance des processus perceptifs et cognitifs mis en œuvre par le piéton dans l'activité de traversée de rue. Cette activité, qui est une tâche complexe, peut se décrire en référence à des modèles psychologiques classiques, adaptés à la locomotion, dans une perspective de simulation de la traversée de rue. Les enjeux d'accidentologie nous incitent à nous centrer sur la décision de traversée comme étant un moment clé (stade 2 de la traversée selon Firth (1982)), pour lequel nous avons montré que les modèles informatiques de simulation de piéton ne sont, à l'heure actuelle, pas adaptés. En effet, ces modèles de simulation des piétons sont principalement tournés vers la simulation des mouvements, typiquement les mouvements de foule comme dans (Blue & Adler, 2000), et les autres modèles examinés dans cet article envisagent principalement l'environnement comme une source de modulation de la marche (forces sociales chez Helbing et Molnár (1995), forces physiques chez Hoogendoorn et Bovy (2002), motivationnelles chez Teknomo (2006)). Dans le modèle que nous proposons, le moment clé (qui n'existe pas dans une situation de foule, sans interaction piéton/véhicule) est la décision de traverser.

À partir de la revue de littérature que nous avons réalisée, il est possible de proposer une ébauche de modèle informatique de la traversée de rue, ou du moins de définir un ensemble de contraintes minimales que devrait respecter un tel modèle. Nous aurions pu envisager de combiner un modèle de conducteur (e.g. Bellet & Tattégrain-Veste, 1999) à un modèle de piéton (e.g. Teknomo, 2006), mais ces modèles sont construits sur des présupposés qui les rendent difficilement compatibles.

Une structure de modèle qui semble appropriée d'un point de vue de la simulation informatique est celle d'un système multi-agent (Ferber, 1995), dans lequel les *agents* (piétons et automobilistes) partagent des modes de fonctionnement communs, tout en se distinguant par certaines de leurs propriétés (relations à l'espace, vitesse, attributs comme les clignotants, etc.). Chaque agent doit être, au minimum, doué de compétences perceptives et cognitives (Goffman, 1971), (Tolmie *et al.*, 2002), notamment de capacités à anticiper (Gibson & Crooks, 1938), (Endsley, 1995a),

ce qui implique une représentation interne de la situation en cours, au niveau de chaque agent, pour que cette représentation donne lieu à une projection dans le temps et l'espace. Cette représentation résulte d'un processus qui met en jeu des compétences perceptives (prise d'information) et cognitives (sélection d'information, attention visuelle). Le modèle que nous proposons comprend trois étapes principales : la perception, la compréhension (représentation) de l'environnement et l'anticipation. Chacune de ces étapes est alimentée, en partie, par un ou plusieurs modèles psychologiques cités dans cet article. La Fig. 2 illustre les articulations de ces modèles dans les étapes que nous proposons de modéliser tout en rappelant que notre modélisation concerne le niveau tactique du modèle d'Allen (1971).

7.1. Première étape, la perception

Les compétences perceptives de prise d'information, pour être rendues opérationnelles, impliquent naturellement qu'une base de données commune aux différents agents (piéton, conducteur) soit disponible, sous une forme qui peut être, ou non, sémantique. Nous nous intéressons ici à la prise d'information visuelle, par opposition à d'autres modalités sensorielles.

Les connaissances actuelles à propos de la prise d'information (balayage visuel pour Goffman (1971)) sont très lacunaires pour une situation de traversée et il est hasardeux de transposer des données comportementales (par exemple, oculométriques) obtenues dans des situations et des tâches différentes. Par ailleurs, la notion d'un agent omniscient, habituellement utilisée, semble trop forte. En accord avec la position prise par Blue et Adler (2000), nous proposons une vision limitée dans l'espace. Malgré des difficultés d'implémentation, la notion de ressources cognitives limitées (Norman & Bobrow, 1975) pourrait constituer une base plus réaliste que le modèle de Blue et Adler (2000) pour rendre compte de l'imperfection des décisions prises, aussi bien par les piétons que par les automobilistes.

En matière de sélection de l'information, on distinguera, conformément aux modèles existants, deux types de notions : la recherche d'information et son traitement. En matière de traitement de l'information, deux approches sont possibles. Une approche par les *capteurs de vision* impliquerait que chaque agent traite en continu les images de son environnement, de manière à sélectionner des éléments signifiants (Peters & Sullivan, 2003). Dans un tel modèle, la notion de saillance visuelle devient essentielle (Oxley *et al.*, 1995), (Paulmier *et al.*, 2001), (Itti & Koch, 2001). Une approche de plus haut niveau consisterait à traiter l'environnement (dans la simulation) directement au niveau sémantique des objets d'intérêt — saillants, non au sens visuel, mais au sens de l'action en cours (Tolmie *et al.*, 2002), (Auberlet & Brémond, 2008) —, comme c'est le cas pour les autres agents mobiles (piétons, conducteurs), les feux de signalisation, la signalisation verticale, etc.

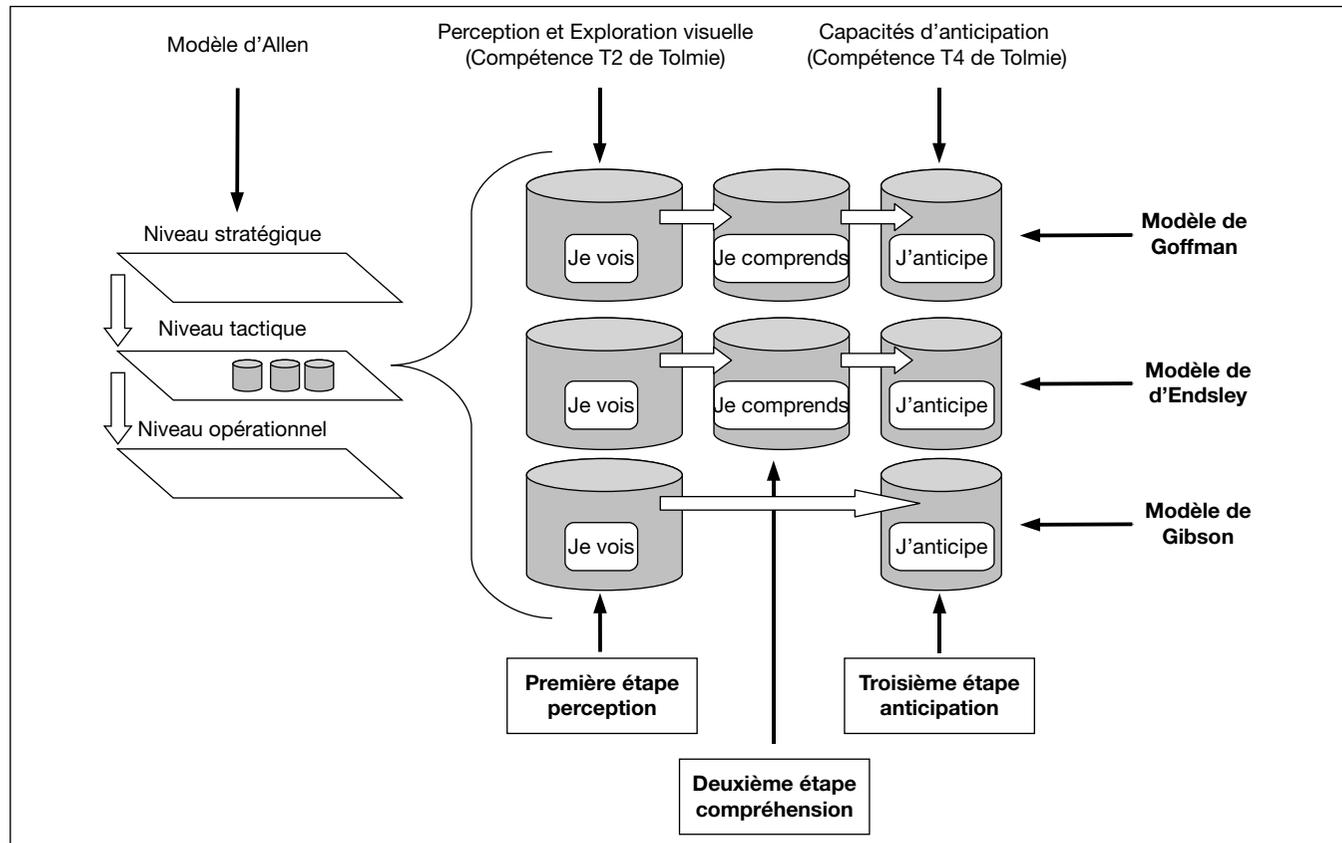


Fig.2 Articulation des principaux modèles psychologiques cités dans notre modélisation informatique de la traversée de rue D'après (Gibson & Crooks, 1938), (Allen *et al.*, 1971), (Goffman, 1971), (Endsley, 1995a), (Tolmie *et al.*, 2002).

7.2. Deuxième étape, la compréhension de l'environnement

La représentation de la situation par le piéton est située, au sens où elle dépend de la situation individuelle du piéton. Nous pensons que cette étape est indispensable pour la simulation de la traversée de rue. Ainsi le piéton (simulé) peut, à travers cette représentation, comprendre l'espace qui l'entoure et envisager les déplacements qu'il pourra réaliser. On retrouve la notion de champ de déplacement sûr (le *field of safe travel* de (Gibson et Crooks, 1938)). Ce champ a été implémenté dans des modèles informatiques de piétons (Helbing & Molnár, 1995), (Hoogendoorn & Bovy, 2002), (Teknomo, 2002) au moyen de champs de force, avec des significations différentes. Quoiqu'il en soit, il s'agit là d'un outil efficace sur le plan informatique, dont la souplesse permet de créer une représentation subjective de la scène par le piéton, incluant des notions comme les motivations, les obstacles, l'enveloppe protectrice (Goffman, 1971).

Toutefois, les modèles actuels doivent être enrichis de ce point de vue, pour prendre en compte les connaissances *a priori* qu'ont les agents du fonctionnement de l'espace. Par exemple, bon nombre d'indices visuels peuvent s'insérer dans une représentation orientée vers l'action uniquement parce que des connaissances pratiques leur sont associées (e.g. feux

de circulation, clignotants, freinage, etc.). Une partie de ces connaissances, qui résultent d'un apprentissage social, peut se rapporter à la notion de *glose corporelle* de Goffman. Plus largement, la question qui est posée, et qui reste difficile à rendre opérationnelle dans un modèle informatique, est celle de la signification, exprimée par Endsley (1995a) en termes d'interprétation de ce qui est perçu. Les connaissances *a priori* et la *glose corporelle* représentent deux aspects de ce problème de traduction du quantitatif en qualitatif, problème qui doit être traité car c'est à ce niveau qu'est réalisé ce que Tolmie *et al.* (2002) appellent le filtrage de l'information pertinente (voir aussi (Mundutéguy & Darses, 2007)).

7.3. Troisième étape, l'anticipation

L'anticipation est un autre point faible des modèles existants alors qu'il s'agit d'une compétence critique, tant chez le piéton que chez l'automobiliste. De nombreux modèles psychologiques insistent sur son importance dans les déplacements (e.g. (Endsley, 1995a), ainsi que (Tolmie *et al.*, 2002) à travers la compétence de jugement temporel). Pourtant, les modèles informatiques les plus avancés dans la modélisation de l'anticipation (Paris *et al.*, 2007) implémentent l'anticipation sous la forme d'une projection illimitée de

l'état actuel dans le futur (e.g., vitesse constante), ce qui conduirait certainement à des prévisions erronées en situation de carrefour. C'est ce qui nous amène à proposer d'intégrer au modèle de piétons les interactions avec les automobilistes par une modélisation de l'anticipation qui prenne en compte à la fois le contexte (feux tricolores, clignotants) et les connaissances *a priori* (qui peuvent être différentes, par exemple, entre adultes et enfants). D'autre part, la notion de *couche d'anticipation* proposée par Davidsson (2003) est intéressante ici car elle met l'accent sur l'évaluation des situations futures : l'anticipation n'a de sens que si l'on compare des alternatives d'action et que l'on choisit la plus *satisfaisante*, laquelle peut s'implémenter, informatiquement, par une fonction d'utilité. Pour le cas de la traversée de rue, l'alternative porte sur le fait de traverser à l'instant ou non. L'implémentation informatique de l'évaluation des alternatives (fonction de coût ou d'utilité) reste, à ce stade de notre travail, une question ouverte.

7.4. Conclusion

Les étapes proposées par Firth (1982), notamment les quatre sous-stades d'exploration visuelle, sélection d'informations pertinentes, jugement de la situation et décision de traverser, ainsi que le modèle de Endsley (1995a) de la *conscience de situation* nous fournissent finalement un cadre propice à l'implémentation d'un modèle informatique du piéton, par leur structure séquentielle en niveaux comme par leur capacité à rendre compte des principales compétences perceptives et cognitives qui entrent en jeu dans la décision de traverser.

La Fig. 3 montre les grandes orientations du modèle que nous proposons en respectant notamment les trois étapes : perception, compréhension de la situation (représentation) et anticipation.

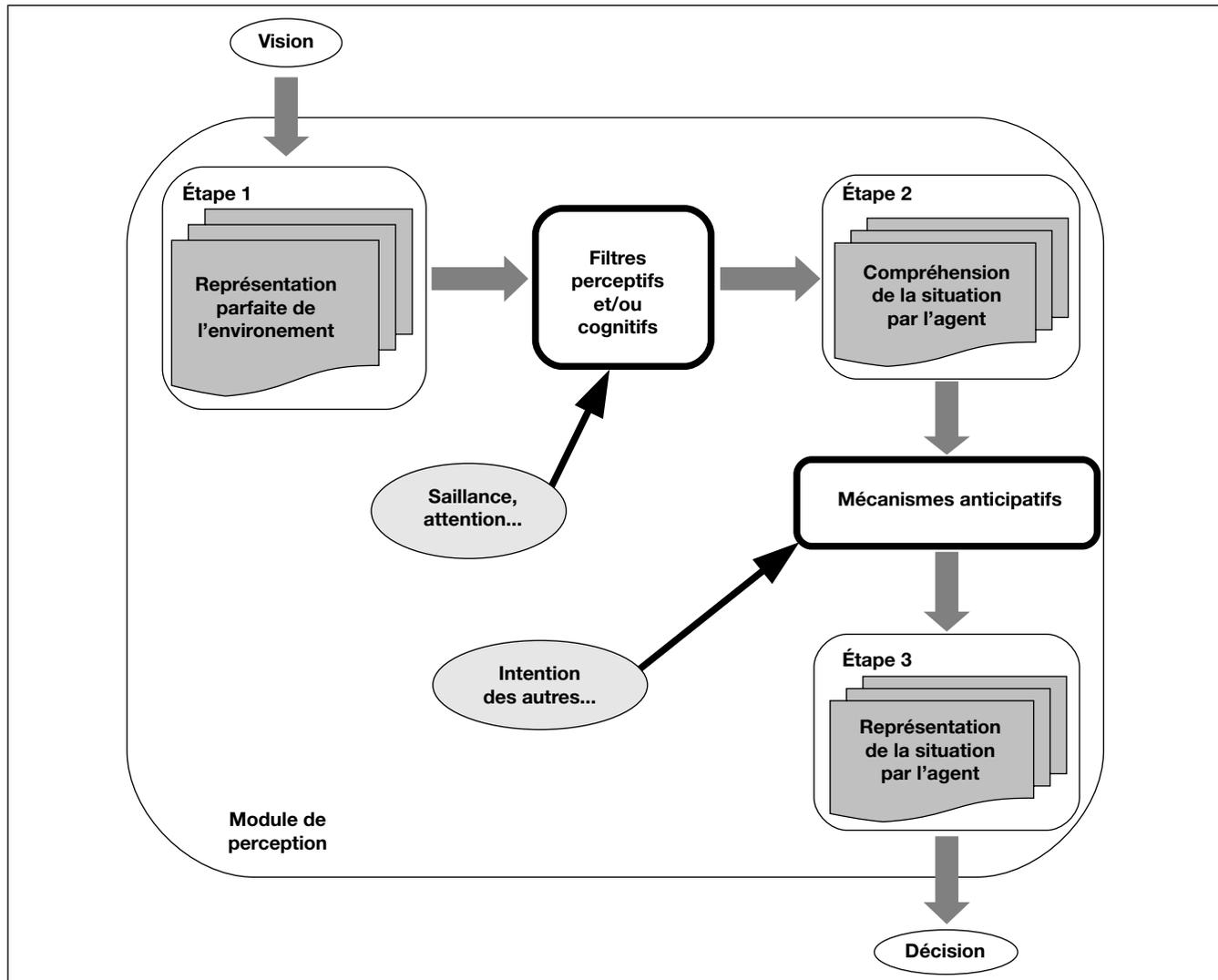


Fig.3 Schéma de principe d'un modèle informatique de perception pour la locomotion d'un agent (piéton ou conducteur) (Floch *et al.*, 2008) d'après (Endsley, 1995a).

Dans cet article, nous avons proposé l'ébauche d'un modèle de simulation de la traversée de rue par des piétons, capable de prendre en compte leurs interactions avec les conducteurs. Nous avons pour cela extrait les concepts les plus pertinents de quelques modèles psychologiques bien adaptés et nous les avons synthétisés. Nous avons volontairement fait des hypothèses simplificatrices, en ce sens que nous n'avons pas tenu compte des compétences affectives, sociales, métacognitives, ni d'ailleurs de l'audition au niveau des compétences perceptives ; par exemple, des études ont montré que les enfants ne sont pas aussi efficaces que les adultes pour localiser les sons (Sandels, 1970) et qu'ils sont plus à même d'être distraits par des sons non pertinents (Gibson, 1968). Nous n'avons pas non plus séparé les processus conscients des processus inconscients (Rasmussen, 1983), alors que cela aurait pu fournir des éléments pour préciser les notions d'attentes et de connaissances *a priori*. Nous avons traité la notion de pression temporelle (Hoc et Amalberti, 2001) de manière indirecte seulement, par exemple à travers les poids à attribuer aux alternatives dans une anticipation, mais ceci peut se justifier par le fait que la décision de traversée, si elle se fait sous pression temporelle, n'est pas un processus dynamique au même sens que la conduite.

Pour conclure, un modèle n'a pas de valeur en lui-même, il est jugé en fonction des situations qu'il est capable de modéliser. À partir d'une version opérationnelle (informatique) de ce modèle, des prédictions seront possibles, et des comparaisons pourront être faites avec des données expérimentales, soit issues de l'observation réelle de traversées en carrefour (e.g. Bergeron *et al.*, 2002), soit, pour certains aspects du modèle, issues de situations en réalité virtuelle (e.g. (Lobjois & Cavallo, 2007) pour les jugements temporels), lesquelles permettront de valider ou d'invalider notre modèle.

Références

- Allen, T.M., Lunenfeld, H., Alexander, G.J., 1971. Driver information needs. Highway Research Board, 366, 102-115.
- Auberlet, J.-M., 2007. Towards a psychological perception in agent modelling. Proceedings of the 21st annual European Simulation and Modelling Conference, St Julian's, Malte, 371-372.
- Auberlet, J.-M., Brémond, R., 2008. Mieux percevoir autrui en anticipant ses intentions. Cas de la locomotion. Quinzièmes Journées francophones sur les SMA (JFSMA), Brest, France 9 p., à paraître.
- Beaird, S., Urbanik, T., Bullock, D.M., 2006. Traffic signal phase truncation in event of traffic flow restriction. Transportation Research Record, 1978, 87-94.
- Bellet, T., Tattegrain-Veste, H., 1999. A framework for representing driving knowledge. International journal of cognitive ergonomics, 3 (1), 37-49.
- Bergeron, J., Thouez, J.-P., Bélanger H., Bourbeau, R., Lord, D., Rannou, A., 2002. Study on conflicts among pedestrians and drivers. Proceedings of the IX PRI World Congress, Madrid, Espagne.
- Björklund, G.M., Åberg, L., 2005. Driver behaviour in intersections: Formal and informal traffic rules. Transportation Research, Part F, 8, 239-253.
- Blackwell, H.R., 1946. Contrast threshold of the human eye. Journal of the Optical Society of America, 36 (11), 624-643.
- Blue, V.J., Adler, J.L., 2000. Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrians flows. Transportation Research Board, 1678, 135-141.
- Brenac, T., Nachtergaële, C., Reigner, H., 2003. Scénarios types d'accidents impliquant des piétons et éléments pour leur prévention. Rapport INRETS, 256, 207 p.
- Butz, M. V., Sigaud, O., Gérard, P., 2003. Internal Models and Anticipations in Adaptive Learning Systems. In: Butz, M.V. *et al.* (eds), Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems. Springer Verlag, Berlin, Allemagne, 86-109.
- Camus, J.-F., 2003. L'attention et ses modèles. Psychologie française, 48, 5-18.
- Julien, A., Carré, J.-R., 2002. Cheminements piétonniers et exposition au risque. Recherche Transports Sécurité, 76, 173-189.
- Davidsson, P., 2003. A framework for preventive state anticipation, In: Butz, M.V. *et al.* (eds), Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems. Springer Verlag, Berlin, Allemagne, 151-166.
- Denis, M., 1991. Image and Cognition. Harvester Wheatsheaf, New York, États-Unis.
- Doniec, A., 2006. Prise en compte des comportements anticipatifs dans la coordination multi-agent : application à la simulation de trafic en carrefour. Unpublished Ph. D. Dissertation.
- Endsley, M.R., 1995a. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. Human Factors, 37, 32-64.
- Endsley, M.R., 1995b. Measurement of situation awareness in dynamic systems. Human Factors, 37, 65-84.
- Endsley, M. R., 2000. Theoretical underpinnings of situation awareness: A critical review, In: Endsley, M.R., Garland, D.J. (eds), Situation Awareness Analysis and Measurement. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, New Jersey, États-Unis, 1-24.
- Ferber, J., 1995. Les systèmes multi-agents. Inter-Éditions.
- Firth, D.E., 1982. Pedestrian Behavior, In: Chapman, A.J. Wade, F.M., Foot, H.C. (eds), Pedestrian Accidents. John Wiley & Sons Ltd, 41-69.
- Floch, C., Auberlet, J.-M., Brémond R., Brézillon, P., 2008. Modélisation de la représentation de l'environnement dans les systèmes multi-agents, Application au contexte du trafic routier. Poster présenté au forum NTIC, SMA et transports, janvier 2008.
- Fontaine, H., Gourlet, Y., 1997. Fatal pedestrian accidents in France: a typological analysis. Accident Analysis & Prevention, 29, 303-312.
- Fruin, J.J., 1971. Pedestrian: planning and design. New York, États-Unis.
- Gegenfurtner, K.R., Kiper, D.C., 2003. Color vision. Annual Review Neuroscience, 26, 181-206.
- Gibbs, C.B., 1954. Servo principles in sensory organisation and the transfer of skill. Applied Psychology Research Unit Publication, Cambridge, Grande-Bretagne.
- Gibson, J.J., 1968. What gives rise to perception of motion? Psychological Review, 75, 335-348.
- Gibson, J.J., Crooks, L.E., 1938. A theoretical field-analysis of automobile-driving. The American Journal of Psychology, 51, 453-471.
- Goffman, E., 1971. Relations in Public: Microstudies of the Public Order. Basic Books, New York, États-Unis.
- Granié, M.-A., 2004. L'éducation routière chez l'enfant : évaluation d'actions éducatives. Rapport INRETS, 254, 258 p.
- Grayson, G.B., 1975. Observations of pedestrians behavior at four sites. Department of the Environment, Transport and Road Research Laboratory Report, 668, Crowthorne, Grande-Bretagne.
- Helbing, D., Molnár, P., 1995. Social force model for pedestrian dynamics. Physical Review, Part E, 51, 4282-4286.
- Hills, B.L., 1980. Vision, visibility, and perception in driving. Perception, 9, 183-216.
- Hoc, J.-M., Amalberti, R., 1994. Diagnostic et prise de décision dans les situations dynamiques. Psychologie Française, 39, 177-192.

- Hoogendoorn, S.P., Bovy, P., 2002. Normative pedestrian behavior theory and modeling. In: Taylor, M.A.P. (ed), *Transportation and traffic theory in the 21st century*. Pergamon, Elsevier Science, Oxford, Grande-Bretagne, 219-245.
- Hoogendoorn, S.P., Bovy, P., 2004. Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research, Part B*, 38, 169-190.
- Hoogendoorn, S., Daamen, W., Campanella, M., Bovy, P., 2007. Delays, variation and anticipation in walker models. *Tristan 2007*.
- Itti, L., Koch, C., 2001. Computational modeling of visual attention. *Nature Reviews Neuroscience*, 2 (3), 194-203.
- James, W., 1890. *The Principles of Psychology*. Holt, New York, États-Unis.
- Koepsell, T., McCloskey, L., Wolf, M., Vernez Moudon, A., Buchner, D., Kraus, J., Patterson, M., 2002. Crosswalk markings and the risk of pedestrian-motor vehicle collisions in older pedestrians. *Journal of the American medical association JAMA*, 288, 2136-2143.
- Knudsen, E.I., 2007. Fundamental components of attention. *Annual Review of Neuroscience*, 30, 57-78.
- Langham, M.P., Moberly, N.J., 2003. Pedestrian conspicuity research: a review. *Ergonomics*, 46, 345-363.
- Lassarre, S., Papadimitriou, E., Yannis, G., Golias, J., 2007. Measuring accident risk exposure for pedestrians in different micro-environments. *Accident Analysis & Prevention*, 39, 1226-1238.
- Latrémoille, M.-È., Thouez, J.-P., Rannou, A., Bergeron, J., Bourbeau, R., Bussière, Y., 2004. Le sexe est-il une variable pertinente pour l'étude du comportement des piétons en intersection urbaine ? *Recherche Transports Sécurité*, 84, 171-188.
- Lee, J.R.E., Watson, R., 1992. Regards et habitudes des passants. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 57-58, 100-109.
- Legge, G.E., Foley, J.M., 1980. Contrast masking in human vision. *Journal of the Optical Society of America*, 70, 1458-1470.
- Lobjois, R., Cavallo, V., 2007. Age-related differences in street-crossing decisions: the effects of vehicle speed and time constraints on gap selection in an estimation task. *Accident Analysis & Prevention*, 39, 934-943.
- Michon, J.A., 1985. A critical view of driver behavior models. What do we know, what should we do? In: Evans, L., Schwing, R. (eds), *Human behavior and traffic safety*. Plenum Press, New York, États-Unis, 485-521.
- Michon, P.-E., Denis, M., 2001. When and Why Are Visual Landmarks Used in Giving Directions? In: Montello, D. (ed), *Spatial Information Theory: Foundations of Geographic Information*. Springer, Morrow Bay, États-Unis, 292-305.
- Mundutéguy, C., Darses, F., 2007. Perception et anticipation du comportement d'autrui en situation simulée de conduite automobile. *Le Travail Humain*, 70, 1-32.
- Norman, D.A., Bobrow, D.G., 1975. On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7, 44-64.
- O'Reagan, K., Deubel, H., Clark, J.J., Rensik, R.A., 2000. Picture change during blinks: looking without seeing and seeing without looking. *Visual Cognition*, 7, 191-211.
- Oxley, J., Fildes, B., Ihsen, E., Day, R., Charlton, J., 1995. An investigation of road crossing behaviour of older pedestrian. Report # 81. <http://www.monash.edu.au/muarc/reports/muarc081.pdf> consulté le 22 octobre 2008.
- Paris, S., Pettré, J., Donikian, S., 2007. Pedestrian reactive navigation for crowds simulations: a predictive approach. *Proceedings of Eurographics' 2007*.
- Paulmier, G., Brusque, C., Carta, V., Nguyen, V., 2001. The influence of visual complexity on the detection of targets investigated by computer generated images. *Lighting Research and Technology*, 33, 197-207.
- Peters, C., O'Sullivan, C., 2003. Bottom-up virtual attention for virtual human animation. *Proceedings of the 16th International Conference on Computer Animation and Social Agents CASA' 2003*, 111-118.
- Posner, M.I., 1980. Orienting of Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3-25.
- Prevost, P., 2002. Stratégies d'anticipation du rôle du contexte dans les tâches visuo-motrices. Thèse de Physiologie et Biomécanique du Mouvement, soutenue le 10 décembre 2002, Université Paris XI Orsay.
- Ranney, T.A., 1994. Models of driving behavior: a review of their evolution. *Accident Analysis & Prevention*, 26 (6), 733-750.
- Rasmussen, J., 1983. Skills, rules, and knowledge: signals, signs and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13,3, 257-266.
- Reason, J., 1990. *Human error*. Cambridge University Press, New York, États-Unis. 1993. *L'erreur humaine (traduction)*. PUF, Paris.
- Rensson, C., 2004. Les piétons sur le devant de la scène. *Techni.Cités*, 67, 1-8.
- Riegler, A., 2001. The role of anticipation in cognition. In: Dubois, D.M. (ed), *Computing anticipatory systems*. *Proceedings of the American institute of physics*, 573, 534-541.
- Rosen, R., 1985. *Anticipatory systems: philosophical, mathematical, and methodological foundations*. Pergamon Press, New York, États-Unis.
- Saad, F., 1999. Analyses of driver's activity in real driving conditions: theoretical and methodological issues. *Proceedings of the first International DRiiVE workshop*, 21-23 juillet 1999, Espoo, Finlande.
- Sandels, S., 1970. Young children in traffic. *British Journal of Educational Psychology*, 40, 111-116.
- Shinar, D., 2007. *Traffic safety and human behavior*. Emerald Group Publishing Limited.
- Simons, D.J., 1999. Gorilla in our midst: sustained inattention blindness for dynamic events. *Perception*, 28, 1059-1074.
- Simpson, G., Johnston, L., Richardson, M., 2003. An investigation of road crossing in a virtual environment. *Accident Analysis & Prevention*, 35, 787-796.
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: is it indeed 90% visual? *Perception*, 25, 1081-1089.
- Stadulis, R.E., 1972. Motor skill analysis: Coincidence-anticipation. *Quest*, 17, 70-73.
- Teknomo, K., 2002. Microscopic pedestrian flow characteristics: development of an image processing data collection and simulation model. Thèse de l'université de Tohoku, Japon.
- Teknomo, K., 2006. Application of microscopic pedestrian model. *Transportation Research, Part F*, 9, 15-27.
- Thomson, J.A., Tolmie, A.K., Foot, H.C., McLaren, B., 1996. Child development and the aims of road safety education: a review and analysis. HMSO, Londres, Grande-Bretagne.
- Tolmie, A.K., Thomson, J.A., Foot, H.C., Whelan, K., Sarvary, P., Morrison, S., 2002. Computer-based pedestrian training resource. DETR, Road Safety Division Report, 27, Londres, Grande-Bretagne.
- Tom, A., Denis, M., 2004. Language and Spatial Cognition: Comparing the Roles of Landmarks and Street Names in Route Instructions. *Applied Cognitive Psychology*, 18, 1213-1230.
- Vos, J.J., 1984. Disability glare, a state of the art report. *Computers & Industrial Engineering Journal*, 3, 39-52.
- Wolfe, J.M., Horowitz, T.S., 2004. What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it? *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 1-7.
- Yang, J., Deng, W., Wang, J., Li, Q., Wang, Z., 2006. Modeling pedestrians' road crossing behavior in traffic system micro-simulation in China. *Transportation Research, Part A*, 40, 280-290.