

Facteurs perceptifs dans la décision de traversée de rue : une étude de laboratoire.

Visual cues in pedestrians' decision to cross: a laboratory study

Lara Désiré¹

ERA33, LR Saint-Brieuc, CETE Ouest, Saint-Brieuc
5, rue Jules Vallès, 22015 Saint-Brieuc Cedex
mél : lara.desire@developpement-durable.gouv.fr

Elodie Gigout

IFSTTAR, Laboratoire MA, Paris
58 Boulevard Lefebvre, 75015 Paris
mél : elodie.gigout@ifsttar.fr

Roland Brémond

Université Paris Est, IFSTTAR, Paris
58, boulevard Lefebvre, 75732 Paris Cedex 15
mél : roland.bremond@ifsttar.fr

Résumé : La simulation informatique, microscopique, des déplacements en ville, est un objectif pour lequel il n'existe pas à ce jour de modèle satisfaisant implémenté. Si les systèmes multi-agents paraissent constituer une approche intéressante au niveau informatique, il est nécessaire d'alimenter les simulations par des modèles de comportement des piétons. Sur ce dernier point, la traversée de rue constitue le point faible des modèles existants. Une expérimentation a été réalisée en laboratoire afin de mieux comprendre la prise de décision de traversée en carrefour, et notamment les indices perceptifs qui entrent en jeu dans cette décision dans des situations complexes. Les résultats de cette expérimentation devraient alimenter les modèles de simulation informatique, en aidant à préciser les règles de décision lors de la traversée de carrefour. L'expérimentation consistait à présenter des clips vidéo de carrefours parisiens à une population de sujets. Il leur était demandé de dire, à l'issue de chaque clip, si la situation leur permettait de traverser. A partir d'un codage descriptif des vidéos, nous avons cherché à modéliser la prise de décision de traverser en carrefour. L'analyse statistique nous a amené à proposer des modèles distincts pour le carrefour à feu et le carrefour sans feu.

Mots clés : piéton, traversée de rue, carrefour, psychologie expérimentale

1 Correspondant principal

1. Introduction

La simulation des déplacements, dans la cadre des projets actuels de ville numérique, constitue un enjeu important qui se heurte à un certain nombre d'obstacles. L'un d'eux porte sur la simulation microscopique des déplacements piétons en ville, pour lesquels il n'existe pas à ce jour de modèle satisfaisant implémenté (Tom et al., 2008). Si le paradigme de l'intelligence distribuée, et notamment les systèmes multi-agents (Ferber, 1995), paraissent constituer une approche intéressante au niveau informatique pour simuler des déplacements urbains au niveau « microscopique » des piétons et des conducteurs de véhicules, il est nécessaire d'alimenter ces simulations de trafic par des modèles de comportement, tant au niveau des conducteurs que des piétons (Bourgois et al., 2010). Or sur ce dernier point, si de nombreux modèles ont été proposés, basés sur les automates cellulaires, sur les forces sociales, etc. (Blue et Adler, 2000 ; Helbing et Molnár 1995 ; Paris et al., 2007 ; Teknomo, 2006), la traversée de rue constitue leur point faible. Des modèles théoriques et quantitatifs existent (notamment en section courante, par exemple sur le *gap acceptance* : Lobjois et Cavallo, 2007, 2009), mais peu d'auteurs se sont intéressés au carrefour urbain et à sa complexité intrinsèque, notamment du fait de la multiplicité des informations disponibles et des problèmes attentionnels et cognitifs que cela peut impliquer.

Une expérimentation a été réalisée en salle de réalité virtuelle afin de mieux comprendre la prise de décision de traversée en carrefour, et notamment les indices perceptifs qui entrent en jeu dans cette décision lors de situations complexes. Les résultats de cette expérimentation devraient alimenter les modèles de simulation informatique, en aidant à préciser les règles de décision lors de la traversée de carrefour. Cette expérimentation, qui a demandé la mise en place d'un dispositif expérimental innovant (Rabier et al., 2009) a été réalisée en laboratoire, avec la présentation à des sujets de clips vidéos expérimentaux de carrefours parisiens à l'échelle 1 sur un angle horizontal de 160°. Ces clips ont été enregistrés sur deux carrefours, l'un à feu, l'autre sans feu. Il était demandé aux sujets de dire, à l'issue de chaque clip, si la situation leur permettait de traverser. Leur réponse constitue la variable dépendante, à expliquer, de cette expérimentation.

A partir de ces données expérimentales, deux approches complémentaires ont été suivies. La première a consisté à faire verbaliser les sujets, juste après leur réponse, en leur demandant de justifier leur décision. Le codage de ces verbalisations a ensuite été organisé à partir d'une catégorisation *a priori* des indices visuels jugés pertinents pour la traversée de rue, et une régression logistique binaire a permis de proposer un modèle quantitatif implémentable de la décision de traverser, en même temps que des résultats qualitatifs interprétables en termes psychologiques (Tom et Brémond, 2009). La seconde approche, qui est détaillée ici, consiste à expliquer la décision de traverser non pas à partir des justifications *a posteriori*, mais à partir d'une description objective des scènes présentées. Pour cela, un codage des vidéos a été réalisé, à partir d'une classification *a priori* des événements significatifs, et ce codage a été mis en relation avec les décisions individuelles des sujets, en vue de faire émerger des facteurs objectifs déterminant la décision.

2. Matériels et méthodes

2.1. Description des prises de vues projetées en salle de réalité virtuelle

Des clips vidéos d'une durée d'environ 12 secondes ont été sélectionnés parmi les prises de vues enregistrées sur trois carrefours parisiens au niveau d'un passage piétons sur trois tranches horaires (08h00-09h00 ; 12h00-13h00 ; 17h30-18h30). Les trois carrefours retenus (C1, C2 et C3) comportaient deux voies et, puisque le dispositif de visualisation était de 160° et non de 360°, la voie derrière la caméra utilisée pour réaliser la prise de vue était à sens unique pour ne pas avoir d'insertion de véhicule venant de l'arrière. Les carrefours C1 (Convention/Saint-Charles, 15^{ème} arrondissement) et C2 (Ledru-Rollin/Charenton, 12^{ème} arrondissement) sont des carrefours à feu alors que le carrefour C3 (Championnet/Poteau, 18^{ème} arrondissement) est un carrefour sans feu. Les trafics journaliers moyens annuels (TJMA) sont respectivement de 7595, 7185 et 4183 véhicules/jour.

Au total 41 clips ont été retenus pour l'expérimentation. Cinq clips du carrefour C1 ont été retenus pour la familiarisation des participants au protocole expérimental. Dix-huit clips (clips 1 à 18) ont été retenus pour le carrefour C2 soit le carrefour à feu et dix-huit clips (clips 19 à 36) ont été retenus pour le carrefour C3 soit le carrefour sans feu.

2.2. Protocole expérimental

L'expérimentation dans la salle de réalité virtuelle de l'IFSTTAR a été menée par un premier expérimentateur sur 32 participants. La consigne donnée aux participants était la suivante : « Regardez attentivement chaque clip vidéo ; après chaque clip, nous vous poserons des questions (toujours les mêmes) liées à ce que vous aurez vu ». Il était expliqué qu'une image neutre serait projetée à l'issue de chaque clip et qu'il n'existait pas de limite de temps pour répondre aux questions. Après s'être assuré que la consigne était bien comprise et que le participant n'avait pas de question, l'expérimentateur équipait le participant d'un micro-cravate relié à un système d'enregistrement audio. L'expérimentateur conduisait ensuite le participant dans la salle de réalité virtuelle puis il s'asseyait derrière lui afin de lui poser des questions après chaque clip. La phase d'habituation débutait ensuite avec la projection des 5 clips retenus sur le carrefour C1. A l'issue de la phase d'habituation, l'expérimentateur projetait dans un ordre aléatoire les 36 clips retenus pour l'expérimentation soient 18 clips issus du carrefour à feu (C2) et 18 clips du carrefour sans feu (C3). A l'issue de chaque clip, l'expérimentateur posait les quatre questions suivantes aux participants :

- Lorsque le clip s'arrête, que faites-vous?
- Pouvez-vous décrire la scène au moment où le clip s'arrête?
- Qu'est-ce qui est important pour décider de [ne pas] traverser?
- Que pensez-vous qu'il va se passer ensuite?

Suite à des problèmes techniques, les verbalisations ont été obtenues sur 23 sujets. Le codage des verbalisations à la question 1 permettait de connaître l'intention du participant de traverser ou non à

l'issue du clip (variable dépendante binaire : oui/non nommée DECISION). Le codage des verbalisations aux trois autres questions permettait de connaître les indices visuels pertinents utilisés en tant que piétons qui justifient leur décision de traverser ou non. Les résultats de ces verbalisations ont fait l'objet d'une publication en cours de soumission et ne seront pas rapportés ici. (Tom et Brémond, 2009)

2.3. Méthodologie du codage des variables explicatives objectives à partir des vidéos

A l'issue de l'expérimentation dans la salle de réalité virtuelle de l'IFSTTAR, les trente-six clips vidéos pour lesquels les sujets ont exprimés leur décision de traverser ou non ont été transmis à un deuxième expérimentateur afin qu'il réalise une description objective des situation de traversée de rue présentées aux sujets à l'aide du logiciel The Observer XT (Noldus Information Technology). Ce codage visant à identifier les variables explicatives objectives de la décision de traversée d'un piéton dans un carrefour urbain (variable dépendante DECISION), le deuxième expérimentateur n'a eu connaissance des verbalisations des sujets qu'à l'issue de son codage. Les vidéos ont été fournies au format MPEG-4 (profil QuickTime, largeur : 4000 pixels, hauteur : 850 pixels ; codec qt ; 25 images/secondes). Afin de les visualiser à l'aide du logiciel The Observer XT, les 36 séquences vidéos ont été exportées grâce au logiciel MPEG Streamclip au format AVI (largeur : 1000 pixels, hauteur : 212 pixels ; codec M-JPEG ; 25 images/secondes).

Les différents éléments de la scène identifiés *a priori* comme des indices visuels pouvant être utilisés par le sujet pour prendre sa décision de traversée s'inscrivent dans différents cadres théoriques : la notion de conflit (y compris le gap), la notion d'attention (distracteurs, surcharge attentionnelle, etc.), la notion d'influence sociale (influence du comportement des autres piétons, du type de véhicule, etc.), la notion de rapport à la règle (respect des feux de signalisation).

Pour chacune des 36 séquences vidéo, nous avons codé l'identifiant du clip vidéo (variable ID_CLIP), le type de signalisation du carrefour présenté (variable TYPE_CARREFOUR) et nous avons également déterminé la couleur du feu piéton à l'issue de la séquence (variable FEU_PIETON).

Les véhicules et piétons visibles sur la dernière image de la séquence vidéo présentée au sujet ont été repérés. Concernant les véhicules, nous avons identifié les véhicules en mouvement susceptibles d'être perçus par le sujet comme en conflit potentiel. Un véhicule était noté comme en conflit potentiel si sa trajectoire actuelle coupait ou était susceptible de couper la trajectoire du sujet. Par exemple, un véhicule en mouvement sur la voie gauche dont l'avant était orienté vers le sujet et n'effectuant pas de tourne-à-gauche ou de tourne-à-droite était considéré comme un véhicule en conflit potentiel. Par contre, un véhicule en mouvement sur la voie gauche dont l'avant était orienté vers le sujet et effectuant un tourne-à-gauche ou un tourne-à-droite n'était pas considéré comme un véhicule en conflit potentiel. Pour chacun de ces véhicules en conflit potentiel, nous avons codé s'il provenait de la droite ou de la gauche du sujet. Nous avons également codé plus finement la position de chacun des véhicules en conflit à l'issue de la séquence vidéo en indiquant la position de la roue avant gauche

(position 1 à 7) à l'issue de la séquence vidéo selon la grille de la figure 1.

Tableau 1: Les 22 variables utilisées pour décrire objectivement la scène routière à la fin de chacun des 36 clips vidéos dont 20 variables explicatives (en gras).

<i>Désignation</i>	<i>Description</i>
ID_CLIP	identifiant du clip vidéo (variable catégorielle, valeurs de 1 à 36)
TYPE_CARREFOUR	type de signalisation du carrefour (variable catégorielle), avec ou sans feu
FEU_PIETON	Couleur du feu piéton sur la dernière image de la vidéo (variable catégorielle).
CONFLIT_G	Nombre de véhicules en conflit à l'issue du clip et venant sur la gauche du sujet
CONFLIT_D	Nombre de véhicules en conflit à l'issue du clip et venant sur la droite du sujet
POSITION_01	Nombre de véhicules en conflit dont la roue avant gauche est située au niveau du passage piéton face au sujet (zone B)
POSITION_02	Nombre de véhicules en conflit dont la roue avant gauche est située à proximité du passage piéton face au sujet-observateur (hors zone B)
POSITION_03	Nombre de véhicules en conflit à l'issue du clip et dont la roue avant gauche est située dans les zones 3
POSITION_04	Nombre de véhicules en conflit à l'issue du clip et dont la roue avant gauche est située dans les zones 4
POSITION_05	Nombre de véhicules en conflit dont la roue avant gauche est située dans les zones 6 soit les passages piétons de la voie en face et de la voie de gauche
POSITION_06	Nombre de véhicules en conflit dont la roue avant gauche est située dans les zones 6 : les passages piétons de la voie en face et de la voie de gauche
POSITION_07	Nombre de véhicules en conflit dont la roue avant gauche est située dans les zones 7
VL	Nombre de véhicules en conflit potentiel de type véhicule léger non utilitaire
2RM	Nombre de véhicules en conflit potentiel de type deux-roues motorisés
VELO	Nombre de véhicules en conflit potentiel de type deux-roues non motorisés
PL	Nombre de véhicules en conflit potentiel de type poids-lourds
BUS	Nombre de véhicules en conflit potentiel à l'issue du clip de type bus
UTILITAIRE	Nombre de véhicules en conflit potentiel de type véhicule léger utilitaire
PIETON_A	Nombre de piétons à la fin du clip présents dans la zone A et dont les mouvements laissent penser qu'ils sont en attente de traverser
PIETON_C	Nombre de piétons à la fin du clip présents dans la zone C et dont les mouvements laissent penser qu'ils sont en attente de traverser
PIETON_P1	Nombre de piétons dans la zone B traversant dans le même sens que le sujet
PIETON_P2	Nombre de piétons dans la zone B traversant dans le sens opposé au sujet

Enfin, nous avons également codé la catégorie d'appartenance à savoir véhicule léger (VL), deux-

roues motorisés (2RM), bus (BUS), poids-lourds (PL), utilitaire (UTILITAIRE) et deux-roues non motorisés (VELO). Concernant les piétons présents sur la dernière image de la séquence vidéo présentée au sujet, nous nous sommes intéressés uniquement aux piétons en attente de traverser de part et d'autre du passage piéton observé par le sujet (piétons A et C, Figure 1) et aux piétons en mouvement sur ce passage piéton (piéton_P1 et piéton_P2 ; Figure 1). A l'aide de ce codage, nous avons dans un premier temps caractérisé chaque séquence vidéo à l'aide des 22 variables descriptives indiquées dans le tableau 1.

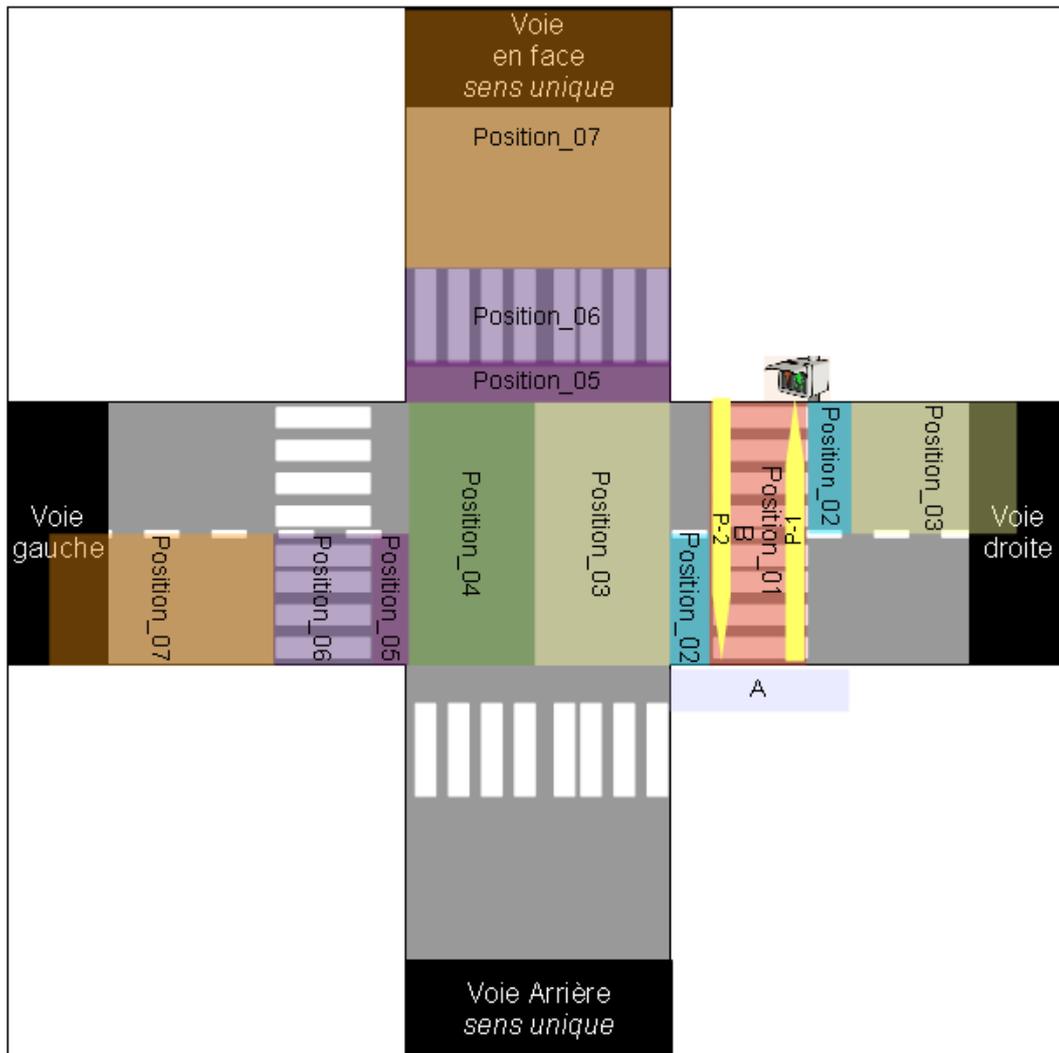


Figure 1 : Grille de repérage des positions des véhicules et des piétons. La zone en pointillé matérialise la partie de l'intersection visible sur les clips vidéos.

Parmi ces 22 variables explicatives, trois variables ont été éliminées du fait de la non observation de véhicules dans cette situation à l'issue des 36 clips (POSITION_01, PL et BUS). La variable POSITION_07 a été éliminée car des véhicules en mouvement dans cette zone à l'issue des clips ont été observés très majoritairement pour le carrefour avec feu. La variable POSITION_02 a été éliminée car des véhicules en mouvement dans cette zone à l'issue des clips ont été observés uniquement pour le carrefour sans feu. Finalement, afin de réduire le nombre de variables explicatives, les variables portant sur la position des véhicules et le type de véhicules ont été agrégées. Suite à cette agrégation, nous obtenons les 10 variables explicatives suivantes :

- FEU_PIETON (uniquement pour le carrefour à feu)
- CONFLIT_G
- CONFLIT_D
- POSITION_03-04 (POSITION_03 + POSITION_04)
- POSITION_05-06 (POSITION_05 + POSITION_06)
- VL
- 2ROUES (VL + VELO)
- UTILITAIRE
- PIETON_IMM (PIETON_A+PIETON_C)
- PIETON_MVT (PIETON_P1+PIETON_P2)

La ou les notions identifiées *a priori* comme des explications de la prise de décision de traverser approchée par ces différentes variables explicatives sont indiquées dans le tableau 2.

Tableau 2: La ou les notions approchées par les 10 variables explicatives.

Variables explicatives	Notion de conflit	Notion d'attention	Notion d'influence	Notion de rapport à la règle
FEU_PIETON				x
CONFLIT_G	type	x		
CONFLIT_D	type	x		
POSITION_0304	distance			
POSITION_0506	distance			
VL		x	x	
2ROUES		x	x	
UTILITAIRE		x	x	
PIETON_IMM			x	
PIETON_MVT			x	

On remarque que par rapport à l'objectif initial, les variables explicatives obtenues ne permettent pas d'approcher complètement les notions identifiées *a priori* comme importante dans la prise de décision de traverser puisque que nous ne disposons pas de variables explicatives rendant compte de la notion de conflit en terme de temps, car il n'a pas été possible, techniquement, de mesurer quantitativement pour les différents véhicules le temps d'arrivée au point de conflit.

A l'issue de ce codage vidéo, l'expérimentateur en charge du codage a obtenu auprès de l'expérimentateur en charge de la passation de l'expérimentation la réponse des 23 sujets à la question 1 portant sur leur décision de traverser ou non (variable à expliquer DECISION) pour chacun

des 36 clips soient 828 observations dont 414 observations sur le carrefour avec feu et 414 observations sur le carrefour sans feu. Dans le cas du carrefour avec feu, la proportion de participants ayant l'intention de traverser est comprise entre 0 et 0,78 pour les quatorze clips dont le feu piéton est rouge (soit 26% d'intention d'effectuer une traversée alors que le feu piéton est rouge) et elle est comprise entre 0,65 et 1 pour les quatre clips dont le feu piéton est vert. Dans le cas du carrefour sans feu, la proportion de participants ayant l'intention de traverser est comprise entre 0,09 et 0,96.

2.4. Analyses statistiques

A l'issue du codage vidéo, nous disposons respectivement de 10 et 9 variables explicatives qualitatives ou quantitatives de la variable DECISION pour le carrefour avec feu et le carrefour sans feu. Des analyses préliminaires ont porté sur la proportion de sujets ayant indiqué qu'ils avaient l'intention de traverser en réalisant des régressions linéaires. Ces analyses n'ayant pas permis d'obtenir une modélisation satisfaisante, elles ne seront pas rapportées ici dans le détail. Néanmoins, elles ont permis de montrer qu'il était préférable de réaliser des analyses distinctes sur le carrefour avec feu et le carrefour sans feu : notamment, une régression linéaire sur les données du carrefour sans feu aboutit à expliquer 21% de la variance seulement, et qui plus est le modèle n'est pas significatif ($p = 0,12$). Au contraire, sur les données du carrefour avec feu, on obtient un modèle significatif ($p = 0,0002$) expliquant 67% de la variance.

Afin d'expliquer la décision de traversée ou non, nous avons donc cherché à construire un modèle à partir des variables explicatives en réalisant des régressions logistiques. Les analyses ont été conduites séparément sur le carrefour avec feu et sur le carrefour sans feu. Puisque nous disposons d'un grand nombre de variables explicatives, de nombreux modèles peuvent être estimés. Afin de sélectionner les modèles, nous avons réalisé une procédure pas à pas ascendante-descendante basée sur le test du rapport de vraisemblance. La variable explicative FEU_PIETON a été codée 1, lorsque le feu était vert, 0 lorsque le feu était rouge. Elle n'était donc pas présente dans l'analyse de carrefour sans feu. La sélection d'un modèle pour le carrefour à feu a donc été effectuée à partir de 10 variables explicatives et pour le carrefour sans feu à partir de 9 variables.

Pour chacun des modèles, afin de quantifier le pouvoir discriminant des variables explicatives retenues, la valeur du R^2 de Nagelkerke est rapportée. Une valeur de 0 signifie que les variables explicatives ne sont pas plus discriminantes que le hasard, et une valeur de 1 signifie que la régression est capable de classer de manière parfaite la prise de décision. Afin de savoir si l'apport des variables est significatif, nous donnons les résultats du test du rapport de vraisemblance pour la significativité globale de la régression. Enfin, pour les coefficients des différentes variables retenues, nous donnons la probabilité obtenue lors du test de Wald. Le risque est fixé à 5%.

Afin d'évaluer l'efficacité du modèle de prédiction construit, à partir de la matrice de confusion nous calculons la valeur des quatre indicateurs suivants permettant de rendre compte de la concordance

entre les valeurs observées et les valeurs prédites :

- taux d'erreur : nombre de mauvais classement rapporté à l'effectif ;
- sensibilité (taux de vrais positifs) : ce ratio indique la capacité du modèle à retrouver les positifs ;
- précision : ce ratio estime la probabilité d'un individu d'être réellement positif lorsque le modèle le classe comme positif ;
- spécificité : ce ratio, à l'inverse de la sensibilité, indique la proportion de négatifs bien détectés.

Enfin, nous indiquerons le résultat du test de Hosmer-Lemeshow afin d'évaluer la qualité des estimations. Si la probabilité est supérieure au risque de 5%, le modèle issue de la régression fait une estimation des probabilités proches de la réalité. Au contraire, si la probabilité est inférieure au risque de 5 %, alors le modèle issue de la régression fait une mauvaise estimation des probabilités.

3. Résultats

3.1. Carrefour avec feu

La sélection d'un modèle pour le carrefour à feu par une procédure pas à pas ascendante-descendante a été réalisée sur les 414 observations du carrefour avec feu en incluant 10 variables explicatives en entrée. Le modèle proposé à l'issue de l'étape 5 comprend 6 des 10 variables explicatives entrées au début de la procédure de sélection. La méthode exclue les variables suivantes: CONFLIT_G, CONFLIT_D, POSITION_0506 et UTILITAIRE. Le R^2 de Nagelkerke a une valeur de 0,456 ce qui signifie que les variables explicatives permettent bien d'expliquer la variable dépendante DECISION. D'après le test du rapport de vraisemblance pour la significativité globale des coefficients de la régression, ceux-ci sont, pris dans leur globalité, significativement différent de 0 au risque de 5% ($\chi^2_{(6)} = 170,235$, $p = 0,000$). Les valeurs des coefficients du modèle un à un sont indiquées dans le tableau 3. On remarque que les 6 variables explicatives retenues dans le modèle sont significatives.

Tableau 3: Modèle pour le carrefour à feu retenu à l'aide de la procédure de sélection ascendante descendante : estimation de la valeur du coefficient, son écart-type, et la probabilité au test de Wald.

	Coefficients	Ecart-type	p	
Constante	0,3929	0,2857	0,169	
FEU_PIETON	4,2856	0,4994	0,000	***
POSITION_0304	-0,7148	0,2806	0,011	*
VL	-0,4544	0,2253	0,044	*
2ROUES	-0,9180	0,3178	0,004	**
PIETON_IMM	-0,8646	0,2566	0,001	***
PIETON_MVT	0,4717	0,1397	0,001	***

D'après les signes des coefficients, les modalités en faveur de la décision de traverser sur ce carrefour sont la présence d'un feu piéton vert (FEU_PIETON) et la présence de piétons en train de traverser (PIETON_MVT). Les modalités en faveur de la décision de ne pas traverser sur le carrefour avec feu sont la présence de véhicules en mouvement dans les zones 3 et 4 (POSITION_0304), la présence des véhicules légers et de deux-roues en mouvement sur l'ensemble du carrefour (VL et 2ROUES) et la présence de piéton en attente de traverser de part et d'autre du passage piéton (PIETON_IMM).

D'après la matrice de confusion réalisées sur les observations sélectionnées, on observe que le taux de succès global en resubstitution est de 80,4 % pour ce modèle. Concernant les réponses positives à la décision de traversée, la sensibilité est de 60,4 % et la précision est de 86,1 %. Enfin, la spécificité est de 93,6 %. Le test de Hosmer-Lemeshow n'est pas en faveur d'une bonne adéquation du modèle avec les données ($\chi^2_{(7)} = 39,455$, $p = 0,000$) ce qui signifie que les prédictions issues du modèle retenu sont peu fiables.

3.2. Carrefour sans feu

La sélection d'un modèle pour le carrefour sans feu par une procédure pas à pas ascendante-descendante a été réalisée sur les 414 observations avec 9 variables explicatives en entrée. Le modèle proposé comprend 5 variables. La méthode exclue les variables suivantes : CONFLIT_G, UTILITAIRE, PIETON_IMM et PIETON_MVT. Cela signifie qu'aucune des variables décrivant le comportement des piétons n'explique la prise de décision de traverser sur le carrefour sans feu.

Le R^2 de Nagelkerke a une valeur de 0,134 ce qui signifie que les variables explicatives contribuent très faiblement à l'explication de la variable dépendante DECISION. D'après le test du rapport de vraisemblance pour la significativité globale des coefficients des variables présentes dans la régression, ceux-ci sont significatifs au risque de 5% ($\chi^2_{(5)} = 43,893$, $p = 0,000$). Les valeurs des coefficients du modèle sont indiquées dans le tableau 4. On remarque que les 5 variables explicatives retenues dans le modèle sont significatives.

Tableau 4: Modèle pour le carrefour sans feu retenu à l'aide de la procédure de sélection ascendante descendante : estimation de la valeur du coefficient, son écart-type, et la probabilité au test de Wald.

	Coefficients	Ecart-type	p	
Constante	1,3673	0,3709	0,000	***
CONFLIT_D	-1,1489	0,3210	0,000	***
POSITION_0304	0,7564	0,3114	0,015	*
POSITION_0506	2,6881	0,4683	0,000	***
VL	-2,1543	0,3831	0,000	***
2ROUES	-,1268	0,3255	0,001	***

D'après les signes des coefficients, les modalités en faveur de la décision de traverser sont la présence de véhicules dans les zones 3, 4, 5 et 6 (POSITION_0304 et POSITION_0506). Les

modalités en faveur de la décision de ne pas traverser sont la présence de véhicule en mouvement sur la droite (CONFLIT_D) et la présence des véhicules légers et de deux-roues en mouvement sur l'ensemble du carrefour (VL et 2ROUES).

D'après la matrice de confusion réalisée sur les observations sélectionnées, on observe que le taux de succès global en resubstitution est de 57 % pour ce deuxième modèle. Concernant les réponses positives à la décision de traversée, la sensibilité est de 37,8 % et la précision est de 44,9 %. Enfin, la spécificité est de 69,6 %. Le test de Hosmer-Lemeshow n'est pas en faveur d'une bonne adéquation du modèle avec les données ($\chi^2_{(6)} = 20,199$, $p = 0,000$) ce qui signifie que les prédictions issues du modèle sont peu fiables.

3.3. Synthèse des résultats

Les variables explicatives de la décision de traverser par type de carrefour (avec feu *versus* sans feu) sont indiquées dans le tableau 5. On observe que les variables explicatives de la décision communes aux deux types de carrefour sont VL, 2ROUES et POSITION_0304. D'après le signe des coefficients, on observe que pour les deux carrefours, la décision de ne pas traverser est plus probable si le nombre de véhicules légers et de deux-roues en conflit potentiel sur l'ensemble du carrefour augmente. Par contre, l'augmentation du nombre de véhicules en mouvements dans les zones 3 et 4 a un effet différent selon le carrefour.

Tableau 5: Récapitulatif des variables incitatives (+) et inhibitrices (-) de la décision de traverser, pour les deux types de carrefour.

	Carrefour avec feu	Carrefour sans feu
FEU_PIETON	+	Non applicable
CONFLIT_G		
CONFLIT_D		-
POSITION_0304	-	+
POSITION_0506		+
VL		-
2ROUES		-
UTILITAIRE		
PIETON_IMM	-	
PIETON_MVT	+	

Concernant les variables explicatives spécifiques au carrefour avec feu, les variables incitatives sont FEU_PIETON et PIETON_MVT. La variable inhibitrice est PIETON_IMM. Cela signifie (ce qui est tout à fait attendu) que la décision de traverser est plus probable lorsque le feu piéton est vert que lorsqu'il est rouge, et lorsque le nombre de piéton en train de traverser augmente. Au contraire, plus le nombre de piétons en attente de traverser augmente, moins la décision de traverser est probable. Concernant les variables explicatives spécifiques au carrefour sans feu, on a la variable incitatrice POSITION_0506, ce qui peut sembler contre-intuitif, et la variable inhibitrice CONFLIT_D, ce qui est

dans le sens attendu.

4. Discussion

Ce travail exploratoire visait à identifier les variables objectives explicatives de la prise de décision de traverser par des sujets en carrefour et à proposer un modèle quantitatif de la décision de traverser à partir des éléments perçus dans l'environnement proche. Dix variables potentiellement explicatives identifiées sur la base des vidéos ont été choisies en vue d'approcher 4 notions susceptibles d'expliquer la décision de traverser, à savoir la notion de conflit, la notion de surcharge attentionnelle, la notion d'influence du comportement des usagers (piétons et conducteurs) et la notion de rapport à la règle (Tableau 1).

On notera tout d'abord que l'intention de traverser est comprise entre 0 et 0,78 pour les quatorze clips dont le feu piéton est rouge, ce qui représente un taux d'intention de traversée illégale de 26%. Pour comparaison, Rosenbloom (2009) en situation naturelle de traversée observent un taux d'environ 13%. Donc, malgré le biais expérimental de conformité lié à la présence de l'expérimentateur, les sujets expriment l'intention de se comporter illégalement. On pouvait s'attendre à ce que ce biais de conformité soit particulièrement important dans cette tâche expérimentale puisque Rosenbloom (2009) a observé que les traversées illégales de piétons diminuent en présence d'autres piétons. Ceci souligne que cette situation expérimentale semble adaptée pour apprécier les variables explicatives de la décision de traverser.

La possibilité de proposer un modèle quantitatif de la décision de traverser à partir de cette étude semble prématurée. En effet, dans le cas du carrefour avec feu, bien que les variables explicatives semblent permettre d'expliquer la décision de traverser, le résultat du test de Hosmer-Lemeshow suggère que les prédictions du modèle sont de mauvaise qualité. Dans le cas du carrefour sans feu, le modèle proposé n'explique que très faiblement la décision de traverser et le résultat du test de Hosmer-Lemeshow indique également des prédictions de mauvaise qualité. Cela peut s'interpréter de deux manières : d'une part, les variables objectives, descriptives de l'environnement, que nous avons codées ne sont sans doute pas suffisantes, et un codage plus fin semble maintenant nécessaire, notamment sur des notions de vitesse et d'accélération des véhicules. D'autre part, ces résultats suggèrent également qu'il faut prendre en compte des variables subjectives et que la description objective de l'environnement n'explique pas tout. Il reste que l'identification de variables explicatives objectives différentes selon le type de carrefour est un résultat intéressant qui doit nous faire progresser dans la compréhension de la prise d'information en carrefour par les piétons.

Si on regarde de plus près ces résultats, on trouve des variables explicatives communes aux deux carrefours, mais les modèles de la décision de traverser en carrefour sont différents pour le carrefour avec feu et le carrefour sans feu. Ceci rejoint les observations faites dans cette même expérimentation sur l'analyse des variables subjectives explicatives de la décision de traverser (Tom & Brémond, 2009).

Les variables explicatives communes aux deux carrefours concernent le volume de trafic des véhicules légers et des deux-roues. Ainsi, on observe très logiquement que la décision de traverser serait moins probable avec l'augmentation du nombre de véhicules légers et de deux-roues en mouvement sur l'ensemble du carrefour qu'il soit avec feu ou non.

Concernant les variables explicatives spécifiques à chacun des carrefours, on observe pour le carrefour avec feu qu'en dehors des variables décrites ci-dessus, la décision de traverser est plus probable lorsque le feu piéton est vert. Les mouvements des piétons sont également des variables explicatives de la décision de traverser sur le carrefour avec feu. Ainsi, la décision de traversée est plus probable si des piétons sont en train de traverser et moins probable si des piétons sont en attente de traverser. Enfin, l'accumulation de véhicules en mouvement de tout type dans les zones 3 et 4 inhibent de la décision de traverser.

Par contre, pour le carrefour sans feu, les mouvements des piétons ne sont pas des variables explicatives de la décision de traverser. On observe que l'accumulation de véhicules en mouvements sur la droite du sujet inhibe la décision de traverser. Enfin, en contradiction avec ce qui est observé pour le carrefour avec feu, l'accumulation de véhicules en mouvements dans les zones 3-4 et dans les zones 5-6 est également en faveur de la décision de traversée, ce qui peut sembler contre-intuitif, mais doit être relativisé car globalement, les véhicules sont également pris en compte par les variables CONFLIT_D et VL. Cela peut s'expliquer par le fait que l'accumulation de véhicules dans des zones proches du passage piéton recouvre des réalités sur le fonctionnement du trafic tout à fait différente entre les deux carrefours notamment en termes de vitesses pratiquées et donc de gap en termes de temps très différents. En effet, si on regarde plus précisément ces deux zones (Figure 1), on observe que dans le cas du carrefour à feu, l'accumulation des véhicules en mouvement dans les zones 3 et 4 signifie que les feux véhicules sont passés au vert et donc des véhicules en circulation avec un caractère prioritaire sur les piétons et donc plutôt des vitesses croissantes. Par contre, dans le carrefour sans feu, cette accumulation de véhicules en mouvement dans ces zones peut aussi traduire un effet de congestion et donc un ralentissement du trafic provoquant des gaps temporels jugés comme suffisants par les piétons pour prendre la décision de traverser. Cette hypothèse de congestion est renforcée par le fait que l'accumulation de véhicules dans les zones adjacentes 5 et 6 est également une variable explicative en faveur de la décision de traverser pour le carrefour sans feu. La vérification de cette interprétation nécessiterait de disposer d'une variable explicative permettant d'approcher la notion de conflit en termes de temps. Un codage des vitesses pourrait être facilité et objectivé à l'aide de l'outil de recueil de données trafic (vitesse de véhicules, des piétons, temps à la collision...) par traitement d'image tel que celui développé par l'Université de Vancouver (Ismail *et al.*, 2009).

On remarque que les variables descriptives des mouvements des piétons sont explicatives uniquement pour le carrefour avec feu où l'intention de traverser augmente avec la présence de piétons en train de traverser et diminue avec la présence du nombre de piéton en attente de traverser. Ceci peut suggérer que les piétons utilisent le comportement des autres piétons pour prendre leur

décision de traverser, tout du moins dans le carrefour avec feu. On pourrait considérer que la présence de piétons en train de traverser ou en attente de traverser n'est pas directement utilisée par le sujet mais qu'elle traduit des conditions de réalisation de la tâche de traversée plus propices qui sont perçues tant par les piétons présents sur la vidéo que les sujets ; néanmoins, Tom et Brémond (2009) ont observé que les verbalisations sur la présence de piétons permet de mieux expliquer la décision. Ceci suggère que le mouvement des autres piétons est bien un facteur utilisé consciemment par les sujets.

5. Conclusion

Par rapport à l'objectif applicatif d'intégration dans une simulation informatique du trafic urbain, on notera que ce modèle quantitatif est bien adapté à une implémentation informatique, car il permet de calculer une décision à partir des éléments perçus dans l'environnement proche, avec des poids qui sont donnés par le modèle logistique. Malheureusement, le pouvoir explicatif de ces modèles restent très faible et la qualité des prédictions est mauvaise. La prise en compte d'une variable descriptive de la notion de conflit en termes de temps permettrait peut-être d'améliorer ces modèles. Enfin, les deux approches utilisées, à partir de données objectives (décrites ici) et à partir des verbalisations, seraient intéressantes à confronter car les processus cognitifs qui conduisent à la décision de traverser sont peu connus, et on peut se demander notamment quel est le degré d'automatisation de cette décision (Rasmussen, 1983), et donc quelle est la connaissance que les sujets ont de leurs propres motivations. En effet, les processus fortement automatisés dans les déplacements (marche à pied, passage de vitesse, guidage visuel à l'aide du marquage, etc.), n'étant pas explicitement conscients, ne sont pas forcément rappelés par les sujets (e.g. Rosey et al, 2008), ce qui limite la pertinence de l'approche subjective ; réciproquement, les piétons opèrent une sélection des informations pertinentes dans leur environnement, ce qui limite la portée d'une approche purement descriptive comme celle qui est présentée ci-dessous. C'est finalement de la confrontation de ces deux approches, plutôt que de l'une d'entre elles, que nous attendons une meilleure compréhension du processus psychologique de la prise de décision de traversée en carrefour.

6. Bibliographie

Blue, V.J., Adler, J.L. (2000). Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrians flows. *Transportation Research Board*, 1678, 135-141.

Bourgois, L., Oulhaci, A., & Auberlet, J. (2010). *Simulation de déplacement de piétons : Vers un modèle de perception et de prédiction d'action chez autrui*. Présenté aux 18èmes journées francophones des systèmes multi-agents, Madhia, Tunisie.

Ferber, J. (1995). *Les systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective*. Paris : Inter-Editions

Helbing, D., Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review, Part E*, 51(5), 4282-4286.

Ismail, K., Sayed, T., Saunier, N., & Lim, C. (2009). Automated analysis of pedestrian-vehicle conflicts using video data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2140, 44-54.

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(5), 934-943.

Lobjois, R., & Cavallo, V. (2009). The effects of aging on street-crossing behavior : From estimation to actual crossing. *Accident Analysis & Prevention*, 41(2), 259-267.

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

Rabier, R., Brémond, R., & Auberlet, J. (2009). *Un système de prise de vue panoramique bas-coût pour la réalité virtuelle*. Présenté aux 22èmes Journées de l'Association Francophone d'Informatique Graphique, Arles, France.

Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules, and Knowledge: Signals, signs, symbols and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems: Man and cybernetics*, smc- 13(3), 257-266.

Rosenbloom, T. (2009). Crossing at a red light: Behaviour of individuals and groups. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12(5), 389-394. doi:10.1016/j.trf.2009.05.002

Rosey, F., Auberlet, J., Bertrand, J., & Plainchault, P. (2008). Impact of perceptual treatments on lateral control during driving on crest vertical curves: A driving simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 40(4), 1513-1523.

Teknomo, K. (2006). Application of microscopic pedestrian simulation model. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 9(1), 15-27.

Tom, A., Auberlet, J., & Brémond, R. (2008). Approche psychologique de l'activité de traversée de piétons au carrefour : Implications pour la simulation. *Recherche Transports Sécurité*, 101, 265-279.

Tom, A., & Brémond, R. (2009). *Etude de la traverse de rue en carrefour par réalité virtuelle* (Rapport technique). Projet SiCaP. Paris, France: INRETS.

7. Remerciements

Les auteurs remercient Ariane Tom pour l'utilisation des données issues de son expérimentation.