



HAL
open science

Le contrôle de l'interception d'un créneau en mouvement : Le cas de la traversée d'intersection

Nicolas Louveton

► **To cite this version:**

Nicolas Louveton. Le contrôle de l'interception d'un créneau en mouvement : Le cas de la traversée d'intersection. Psychologie. Aix-Marseille Université, 2012. Français. NNT : . tel-00795589

HAL Id: tel-00795589

<https://theses.hal.science/tel-00795589>

Submitted on 28 Feb 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ D'AIX-MARSEILLE

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Sciences du Mouvement Humain

présentée par

Nicolas Louveton

en vue d'obtenir le grade de docteur d'Aix-Marseille Université.

**Le contrôle de l'interception d'un créneau en mouvement :
Le cas de la traversée d'intersection**

Soutenue le 5 octobre 2012 devant le jury composé de :

Nicolas	BENGUIGUI	PR. Université Basse-normandie. Caen	Président du jury
Bernard	THON	PR. Université Paul Sabatier. Toulouse	Rapporteur
John	WANN	PR. Royal Holloway, University of London	Rapporteur
Catherine	BERTHELON	DR. IFSTTAR. Salon-de-Provence	Directrice de thèse
Reinoud J.	BOOTSMA	PR. Aix-Marseille Université. Marseille	Directeur de thèse
Gilles	MONTAGNE	PR. Aix-Marseille Université. Marseille	Directeur de thèse

École Doctorale Sciences du Mouvement Humain – ED 463
UMR 7287 CNRS & Aix-Marseille univ. – Institut des Sciences du Mouvement *É.-J. Marey*
IFSTTAR – Mécanismes d'Accidents (Salon-de-Provence)

Révision :
Ofbc129 / 6 décembre 2012

Cette thèse est publiée sous licence :
Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported License



Plus d'informations sur le site : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>

Table des matières

Introduction générale	4
I Introduction	6
1 Contexte et motivation du travail	7
1.1 La conduite en intersection	7
1.2 Objectifs de ce travail	9
2 Aspects théoriques	11
2.1 La traversée d'intersection : plus qu'une tâche de jugement perceptif?	11
2.2 Explicitation et choix d'une théorie de l'information	16
2.3 Analyse du contrôle continu dans l'activité de traversée d'intersection	24
2.4 Problématique	29
3 Méthodologie générale	32
3.1 Présentation du simulateur de conduite	32
3.2 Scénario expérimental	33
3.3 Acquisition et analyse des données	36
II Chapitres expérimentaux	39
4 L'importance du couplage perception-action	40
4.1 Synthèse	40
4.2 Manuscrit de l'étude	42
5 Quel support perceptif pour quelle variable optique?	55
5.1 Synthèse	55
5.2 Manuscrit de l'étude	58
6 Mise à l'épreuve d'une stratégie de (dé-)synchronisation fondée exclusivement sur l'angle de relèvement	74
6.1 Synthèse	74
6.2 Manuscrit de l'étude	76

III	Discussion générale	92
7	Discussion	93
7.1	Rappel des principaux résultats	93
7.2	Synthèse et problématisation	97
8	Perspectives	100
8.1	Du contrôle aux affordances	100
8.2	Implémentation d'un système d'assistance à la conduite fondée sur les lois de contrôle . . .	104
9	Conclusion	108
	Bibliographie	118
	Table des figures	122
	Liste des tableaux	123
IV	Annexes	124
A	Disponibilité des données et des codes sources	125
B	Configuration du modèle de véhicule du simulateur	126
C	Simulations numériques	127
C.1	Méthodologie de la modélisation	127
C.2	Configuration du script de recherche des coefficients	127
C.3	Résultats de la recherche des coefficients	128

A Juliette et à mon petit Barnabé

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier mes directeurs de thèse :

Gilles Montagne, Reinoud J. Bootsma et Catherine Berthelon. En effet, j'ai eu la chance d'être encadré par trois personnalités très différentes, qui m'ont apporté beaucoup durant ce travail. Je les remercie pour leur disponibilité, leurs conseils et leur bienveillance. Grâce à nos nombreux échanges, j'ai développé mes compétences et mon envie de faire de la recherche.

Il m'importe d'exprimer ici toute ma gratitude aux membres du jury pour avoir accepté d'expertiser ce travail et pour le temps qu'ils y ont consacré.

Bien que la thèse puisse paraître un travail solitaire, aucune ne pourrait être accomplie sans l'aide de personnes généreuses, passionnées et compétentes. Ainsi, je remercie Isabelle Aillerie et Fabrice Vienne de m'avoir formé à la programmation des simulateurs IFSTTAR et de m'avoir aidé à développer les scénarios nécessaires au déroulement de ma thèse. Je remercie également Antoine Morice pour son aide concernant les simulations CBA ainsi que Benjamin de Monsabert pour la formalisation des capacités d'action maximum des conducteurs. Enfin, je salue les participants de mes trois expériences qui m'ont généreusement donné de leur temps. Je remercie également l'IFSTTAR et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur qui ont co-financé ce travail de thèse.

Sans leur présence et leur amitié, ces années de thèse n'auraient pas été ce qu'elles ont été. Aussi, je tiens à remercier mes amis de Grenoble et particulièrement Barthélémy, David, Céline et Marie-Pierre. Je remercie également mes collègues de l'ISM et particulièrement Antoine, Michaël, Colas, Violaine, Pauline, Hugo, Numa, Benjamin, les deux Énora, Cécile, Noémie, Rémy, Simon et Patrick pour avoir égayé la vie quotidienne du laboratoire, pour les pauses cafés, les discussions en tout genre et leur esprit de camaraderie.

Oh! Je n'oublie pas ma famille que je remercie profondément pour m'avoir donné les moyens de cultiver ma curiosité et d'étudier librement ainsi que pour sa confiance dans mes choix.

Nul besoin d'attendre plus longtemps pour remercier ma chère et tendre Juliette, pour sa présence, sa gaieté, son énergie et ses gâteaux qui rendent la vie belle et bonne, et qui a donné la vie à notre petit Barnabé qui nous remplit de joie par ses nombreux sourires.

Avant-propos

Ce travail de thèse a fait l'objet de trois articles, tous trois soumis dans des revues internationales. Ces articles (rédigés en anglais) sont présentés respectivement dans les Chapitres 4, 5, 6 et constituent le corps expérimental de ce travail.

Article 1. Louveton, N., Bootsma, R.J., Guerrin, P., Berthelon, C. et Montagne, G. (2012). Intersection crossing considered as intercepting a moving traffic gap : effects of task and environmental constraints. *Acta Psychologica*, 141(3) :287-294.

Article 2. Louveton, N., Montagne, G. Berthelon, C. et Bootsma, R.J. (2012). Intercepting a moving traffic gap while avoiding collision with lead and trail vehicles : Gap-related and boundary-related influences on drivers' speed regulations during approach to an intersection. *Human Movement Science*, 31(6) :1500-1516.

Article 3. Louveton, N., Montagne, G. Berthelon, C. et Bootsma, R.J. (En préparation). Crossing intersection inside a moving traffic train : specific role of vehicles' optical size and optical expansion on approach speed.

“Sur la route, vous conduisez votre voiture autant que votre voiture vous conduit. Conduire et être conduit sont une seule et même opération [...]. La même relation se noue entre les humains et toutes leurs machines. Elles font ce que vous voulez à condition que vous fassiez ce qu’elles vous forcent à faire.”

Masahiro Mori dans *The Buddha in the Robot*

Introduction générale

La capacité à se déplacer est une caractéristique propre à tous les animaux. Les animaux mettent en œuvre des stratégies perceptives et motrices qui leur permettent de réaliser de telles actions de déplacement de façon sûre et efficace, c'est-à-dire avec fiabilité et aisance. Au cours de l'évolution des espèces, les animaux ont développé un nombre limité et parcimonieux de solutions permettant d'assurer leur besoin de déplacement. A cet égard, la diversité des appareils perceptifs et locomoteurs n'a pas abouti à une multiplication des modes de contrôle du déplacement chez les animaux. Au contraire, des animaux à la morphologie très différente semblent utiliser une même stratégie comportementale quand il s'agit de contrôler un type de "déplacement" particulier (Srinivasan, 1998).

Certains animaux disposent de capacités cognitives leur permettant "d'étendre" leur morphologie et leurs capacités d'action en utilisant des outils. L'Homme est particulièrement concerné par cette capacité "d'évolution technologique" (e.g., les premiers outils en pierre fabriqués par *Homo habilis* datent de 2.6 millions d'années). Le besoin de se déplacer n'a pas fait exception et l'invention de véhicules motorisés a permis d'augmenter l'efficacité des déplacements (rapidité, longueur des distances réalisables sans dépenses physiques). La médiation de l'action de déplacement par un outil aussi performant pose la question de sa mise en œuvre sécurisée. Cette question se pose d'autant plus fortement dans le contexte du développement urbain moderne dans lequel des infrastructures relativement complexes sont empruntées par des usagers très divers (piétons, vélocipèdes, véhicules motorisés de différentes sortes). Pourtant, bien que la conduite d'un véhicule motorisé présente de réelles difficultés (e.g., pression temporelle, nombreux événements simultanés) et même un risque pour la vie, il est loisible d'observer la "facilité" avec laquelle les conducteurs contrôlent leur véhicule quotidiennement. Il est ainsi possible de formuler l'hypothèse que des stratégies perceptives et motrices héritées de l'évolution des espèces soient mises en œuvre de façon efficace dans le cadre du déplacement avec une automobile.

De ce point de vue, la traversée d'une intersection est un exemple de situation de conduite automobile pouvant induire un degré élevé de complexité, que les conducteurs arrivent pourtant à négocier avec un haut niveau de fiabilité. Cette activité implique le croisement des trajectoires de différents véhicules et nécessite donc de contrôler le véhicule de façon à s'intégrer sans collision dans le trafic entrant. Bien que cette activité soit réalisée le plus souvent sans encombre, elle implique par sa complexité un nombre d'accidents qui reste élevé. Cette situation nous a semblé être particulièrement pertinente pour étudier la mise en œuvre de stratégies perceptivo-motrices dans le cadre de la conduite. Ainsi, dans ce travail, nous nous sommes intéressés au contrôle du déplacement d'un véhicule automobile à l'approche d'un flux de trafic à une intersection. Notre approche sera de faire le lien entre cette tâche de conduite à la fois quotidienne mais non triviale et les modèles de contrôle de l'action par la vision qui ont été étudiés dans d'autres contextes, comme celui de l'interception de mobiles.

Pour cela, nous ferons d'abord le point sur le contexte propre à la conduite en intersection (Chapitre 1). Ce chapitre sera l'occasion d'aborder à la fois les manœuvres spécifiques qui peuvent être réalisées en intersection et les statistiques d'accidents qui leurs sont liés. Nous aborderons également la manière avec laquelle le fonctionnement cognitif des conducteurs peut être conceptualisé sous la forme d'une hiérarchie de sous-tâches, caractérisées par différents niveaux d'abstractions (habiletés perceptivo-motrices, règles apprises, décision). Nous mettrons enfin l'accent sur la nécessité de bien comprendre le niveau des habiletés perceptivo-motrices pour éclairer le fonctionnement du comportement de conduite sous fortes contraintes temporelles.

Dans le Chapitre 2, nous proposerons une première revue de littérature sur les études qui ont déjà

abordé la question du contrôle de la conduite en intersection. Nous montrerons que les premières études ont porté essentiellement sur les processus perceptifs et décisionnels. Pourtant, nous montrerons que les actions visuellement guidées impliquent une forte collaboration entre perception et action et qu'il est nécessaire de prendre en compte les deux types de processus simultanément pour comprendre comment ces actions sont réalisées. Ceci nous conduira à aborder la théorie de la perception directe, qui met l'accent sur le couplage entre la perception et l'action dans l'adaptation de l'organisme à son environnement. Ces réflexions théoriques nous conduiront à discuter de la notion d'information visuelle et de son utilisation dans le cadre d'une loi de contrôle. Nous préciserons alors nos hypothèses concernant les informations pertinentes et leur utilisation spécifique dans la situation de traversée d'intersection.

Pour répondre aux questions que nous nous sommes posées dans ce travail nous avons fait appel aux outils de la réalité virtuelle et plus précisément de la simulation automobile. Ces outils nous ont permis d'étudier (sans risque) le comportement des conducteurs dans un environnement face à des contraintes contrôlées expérimentalement et de mesurer conjointement les adaptations comportementales réalisées par les participants au cours du temps. Cette méthodologie à grain fin est la seule qui permette de conserver l'aspect dynamique perceptivo-motrice de la situation (i.e., réalisation active de la tâche et mise en relation continue de l'action avec les contraintes perçues). Les détails de la méthodologie seront exposés dans le Chapitre 3.

Dans les Chapitres 4, 5 et 6 nous présenterons les résultats expérimentaux que nous avons obtenus dans ce travail. Nous exposerons les résultats de la première expérience (Chapitre 4) qui a permis de valider notre hypothèse initiale d'un couplage continu entre perception et action durant la réalisation de la tâche de traversée d'intersection. Cette expérience a également permis de constater que le comportement des participants est orienté vers un but qui pourrait être mis en relation avec une stratégie d'interception de mobile se déplaçant horizontalement. La seconde expérience (Chapitre 5) nous a permis d'identifier quelles sont les contributions perceptives pertinentes du flux de trafic dans le contrôle de la vitesse d'approche. Nous montrerons que les participants utilisent des informations visuelles à différents niveaux de granularité (véhicules du trafic, créneau inter-véhiculaire). Un tel patron comportemental nous a conduit à envisager la tâche de traversée comme la mise en oeuvre complémentaire d'une stratégie de (dé-)synchronisation fondée sur le taux de changement de l'angle de relèvement (i.e., angle entre la direction de déplacement du conducteur et de la position d'une cible à intercepter/éviter). La dernière expérience (Chapitre 6) nous a permis d'atténuer cette hypothèse et d'envisager l'utilisation conjointe d'une information visuelle liée à l'imminence de l'arrivée des véhicules du trafic.

Enfin, les Chapitres 7 et 8 seront l'occasion de faire le bilan des résultats obtenus et de les rapprocher des questions que nous nous étions posées initialement. Il s'agira de mettre en évidence la cohérence de nos résultats mais aussi les limites de ce travail (Chapitre 7). Dans le dernier chapitre (Chapitre 8), nous ébaucherons des pistes concernant la modélisation du comportement et les pistes de valorisation de ce travail dans le domaine appliqué.

Première partie

Introduction

Chapitre 1

Contexte et motivation du travail

1.1 La conduite en intersection

1.1.1 Une activité sous contraintes

L'intersection est une infrastructure nécessaire de tout réseau routier car elle permet la jonction des différents flux de trafic. Cette infrastructure peut prendre différentes formes (nombre de voies, géométrie, lisibilité, visibilité), peut être réglementée (par des signes verticaux ou horizontaux) ou non et elle peut être traversée par des flux de trafic ayant différentes caractéristiques (volume du trafic, débit, types de véhicules). Comme l'intersection est un lieu de croisement des trajectoires de différents véhicules, elle est aussi potentiellement génératrice de nombreux conflits, voire d'accidents. De plus, l'intersection est une étape intermédiaire pour le conducteur qui doit choisir la manœuvre à réaliser en fonction de son itinéraire. A chaque traversée d'intersection, le conducteur doit donc s'adapter ponctuellement à ces différentes contraintes.

1.1.2 Différentes manœuvres et accidents

La difficulté que représente la traversée d'une intersection pour les conducteurs se retranscrit dans les statistiques d'accidents. En effet, cette infrastructure est sur-représentée dans la génération d'accidents de la route en particulier au regard de la surface qu'elle occupe dans le réseau routier. Par exemple, sur les routes françaises en 2007 ([ONISR, 2007](#)), les accidents en intersection représentaient 12% des accidents mortels (soit 569 cas) et 27% des accidents corporels (soit 21 933 cas). De même, aux États-Unis en 2003, les accidents en intersection représentaient 45% (soit 1.4 million d'accidents) de la totalité des accidents de la route ([Richard, 2006](#)).

Plus précisément, toutes les manœuvres réalisables en intersection ne posent pas les mêmes difficultés. Dans leur étude sur les intersections non régulées en rase campagne, [Manzano et Brusque \(2007\)](#) recensent cinq types de manœuvres dont trois semblent particulièrement impliquées dans la production d'accidents : la traversée (le conducteur est sur la voie non prioritaire et traverse sans changer de direction), le franchissement (le conducteur est sur la voie prioritaire et traverse sans changer de direction) et la prise de virage à gauche en insertion (le conducteur est sur la voie non prioritaire et tourne à gauche). Dans une étude européenne plus globale, [Page et Chauvel \(2004\)](#) démontrent que les situations de tra-

versée et de franchissement totalisent ensemble 34% des accidents corporels et 40% des accidents mortels en intersection. Les collisions survenant pendant un changement de direction à gauche en insertion représentent 21% des accidents (en France en 2003 selon la base de données du LAB^a, des chiffres similaires sont trouvés en Allemagne et au Royaume Uni, cf., la même étude). Plus spécifiquement, concernant la manœuvre de traversée, 31% des accidents sont liés à une prise d'information visuelle incorrecte. Ces erreurs perceptives sont caractérisées à 25% par une perception incorrecte de la situation, à 22% par une perception tardive et à 53% par une absence totale de perception de la situation. Par ailleurs, une difficulté d'adaptation aux contraintes temporelles est citée comme contribuant à la production de l'accident dans 16% des cas. Concernant la manœuvre de franchissement, 41% des accidents sont liés à une vitesse inadaptée du véhicule prioritaire. Au final, les manœuvres de traversée et de franchissement d'intersection (sans changement de direction) semblent particulièrement difficile à négocier notamment en termes de perception des contraintes temporelles et d'ajustement de la vitesse du véhicule au regard de ces contraintes.

1.1.3 Différents niveaux de contrôle

De façon générale, la conduite est une activité conçue comme impliquant différents niveaux de contrôle. Michon (1985) a proposé un modèle de la conduite à trois niveaux (voir aussi Van der Molen et Bötticher (1988)) : un niveau stratégique qui correspond à la planification abstraite et globale du déplacement, un niveau tactique qui correspond à la “guidance” de l'activité par diverses prises de décisions liées à une adaptation ponctuelle aux événements qui surviennent lors du déplacement, enfin un niveau opérationnel qui correspond au contrôle du déplacement du véhicule afin de réaliser une conduite sécurisée à chaque instant de l'itinéraire. De ce point de vue, la conduite peut être décrite comme une hiérarchie de sous-tâches réalisées par différents niveaux de contrôle. Ces niveaux de contrôle s'étendent des processus de “haut niveau”, impliquant la prise de décision et la compréhension des situations (fondées sur des connaissances, des règles etc.) et qui se produisent ponctuellement au moment où des situations nouvelles réclament l'attention du conducteur, jusqu'aux processus de plus “bas niveau”, qui impliquent le contrôle du déplacement du véhicule (fondés sur des habiletés et des routines perceptives et motrices) et qui se réalisent de façon constante durant tout le déplacement.

Au-delà de cette présentation séquentielle, il est important de noter que les différents niveaux de contrôle de l'activité sont réalisés simultanément et en interaction les uns avec les autres. Le modèle de l'activité de Rasmussen (1983) propose que l'activité fonctionne en ayant recours à des “connaissances” (comportement de résolution de problème avec un coût cognitif élevé), à des “règles” (routines de fonctionnement verbalisables), et à des “habiletés” (routines automatisées avec un faible coût cognitif). Selon cet auteur, ces trois niveaux sont en interactions constantes (voir la figure 1.1.1).

Concernant la conduite en intersection Staplin *et al.* (1997) proposent une description en sept “sous-tâches” qui devraient être réalisées séquentiellement lors d'une traversée d'intersection^b :

1. Détecter la présence de l'intersection
2. Détecter et interpréter le système de régulation du trafic
3. Interpréter le cycle des feux de signalisation s'ils sont présents

^aLaboratoire Accidents, Biomécanique et comportement humain – Renault et groupe PSA.

^bA partir de cette section, l'expression “traversée d'intersection” renverra à son sens général et non plus à celui plus restrictif utilisé par Manzano et Brusque (2007).

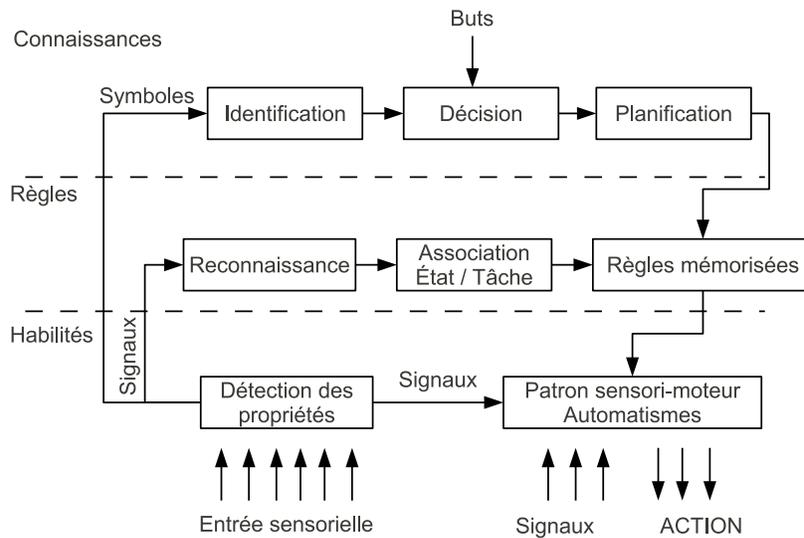


FIGURE 1.1.1 – Modèle hiérarchique du comportement (adapté de [Rasmussen, 1983](#)). Ce schéma fait apparaître une conception du comportement organisé en trois niveaux, allant des activités automatiques et peu coûteuses sur le plan cognitif (habilités) jusqu’aux activités conscientes de prise de décision. Ces trois niveaux de contrôle du comportement s’exécutent simultanément et chacun d’eux prend en entrée un type de donnée approprié (e.g., signaux sensoriels pour les habilités, connaissances sémantiques pour les décisions).

4. Anticiper les accélérations des autres véhicules
5. Prendre en compte l’ensemble du trafic et des autres usagers
6. Éviter les obstacles
7. Réaliser la manœuvre.

Bien que les deux premières sous-tâches concernent les processus perceptifs et que les deux dernières concernent les processus moteurs, les processus de prise d’information et d’ajustement du déplacement du véhicule rentrent en jeu durant toute la réalisation de la tâche. Par ailleurs, comme nous l’avons vu dans la partie précédente, les processus dits de “bas niveau” qu’ils soient perceptifs ou moteurs semblent particulièrement impliqués dans l’occurrence d’accidents. En effet, le contrôle du véhicule est sous-tendu en permanence par le couplage (au sens du verbe coupler) des processus perceptifs et moteurs qui permet l’adaptation aux contraintes de la tâche afin d’aboutir à un comportement de conduite sûr et efficace.

1.2 Objectifs de ce travail

Nous avons pu voir que la conduite en intersection impose des contraintes spatiales et temporelles associées à l’infrastructure d’une part et aux ressources d’action dont dispose le conducteur d’autre part.

La traversée d'une intersection est génératrice d'accidents de la route, ce qui montre que les conducteurs peuvent rencontrer des difficultés à s'adapter aux contraintes de cette tâche. En particulier, les tâches de traversée d'intersection sans changement de direction sont susceptibles de générer des erreurs de perception de ces contraintes ainsi que des erreurs d'ajustement de la vitesse à l'approche de l'intersection. Ces erreurs sont principalement liées aux processus perceptifs et moteurs qui constituent le cœur du niveau "opérationnel" (cf., Section précédente) de l'activité de conduite durant la réalisation d'une manœuvre.

Comprendre comment les conducteurs négocient une intersection nécessite donc d'étudier cette activité sous l'angle des processus perceptifs et moteurs sous-jacents. Dans ce travail, nous essaierons donc de caractériser le comportement perceptivo-moteur du conducteur dans une situation de traversée d'intersection face à un flux de trafic arrivant. Les processus perceptivo-moteurs sont difficiles d'accès car ils ne sont pas verbalisables. Nous utiliserons donc les possibilités de la réalité virtuelle pour accéder à une étude fine du comportement au cours du temps, notamment dans l'étude de l'interaction entre perception et action.

Nous allons proposer un scénario expérimental dans lequel les participants devront traverser une série d'intersections, sans changer de direction, à l'intérieur d'une fenêtre inter-véhiculaire présente dans le flux de trafic arrivant. D'une part, cette tâche correspond à des scénarios d'accidents plausibles et d'autre part elle se rapproche des tâches visuellement guidées étudiées dans le champ du contrôle moteur. En effet, cette tâche se trouve au croisement des tâches d'évitement de collision (avec les véhicules du trafic), d'interception de mobile (ici d'une fenêtre inter-véhiculaire libre du flux de trafic) et de franchissement de fenêtre (passage entre deux bornes).

La mise en lien de la tâche de traversée d'intersection avec les tâches visuellement guidées implique l'utilisation d'un cadre théorique adapté. Les tâches visuellement guidées sont caractérisées par l'interaction constante entre perception et action, c'est-à-dire par le contrôle continu du mouvement au cours du temps. Le prochain chapitre nous permettra d'aborder les concepts théoriques nécessaires à une analyse du comportement du conducteur sous l'angle du contrôle moteur.

Chapitre 2

Aspects théoriques

2.1 La traversée d'intersection : plus qu'une tâche de jugement perceptif ?

2.1.1 La traversée d'intersection comme une tâche de jugement perceptif

De nombreuses études ont été réalisées afin de mieux comprendre le comportement des conducteurs dans la situation de traversée d'intersection (une revue peut être trouvée dans [Caird et Hancock, 2002](#)). L'objectif de ces études est de mettre en lumière les “défaillances humaines” qui sont à l'origine de la production d'accidents dans cette situation. Pour cela, ces travaux se sont focalisés sur les processus cognitifs de haut niveau (règles et connaissances selon [Rasmussen, 1983](#) ; cf., Chapitre précédent). Leur hypothèse sous-jacente est que l'accident en intersection découle d'une erreur de perception des contraintes de la tâche et/ou d'une erreur dans la prise de décision d'initier ou non une manœuvre compte tenu des contraintes de la tâche. Ainsi, les études menées en rapport avec la traversée d'intersection peuvent être classées en deux catégories : d'une part, les études orientées vers la perception des contraintes temporelles face à l'arrivée d'un véhicule du trafic dans l'intersection et d'autre part, les études orientées vers le déclenchement de la prise de décision de traverser ou non une fenêtre inter-véhiculaire (i.e., créneau libre du trafic entre deux véhicules).

Le premier type d'étude correspond de façon générale à une tâche de jugement perceptif dans laquelle les participants visualisent une scène où ils sont soit à l'arrêt au niveau du croisement, soit en mouvement passif vers celui-ci. Un véhicule du trafic approche l'intersection et avant que celui-ci n'arrive face au participant dans l'intersection, la scène visuelle disparaît. Il s'agit du paradigme de “disparition”. Dans ce paradigme, il est supposé que le participant va recourir à l'imagerie mentale ([Kosslyn, 1988](#)) afin de “simuler” la scène visuelle absente et ainsi prédire l'arrivée du véhicule du trafic. Le délai temporel (ou la distance à l'intersection) à partir duquel la disparition de la scène a lieu peut être manipulé expérimentalement. Dans la situation où les participants sont à l'arrêt au niveau de l'intersection, ceux-ci doivent presser un bouton lorsqu'ils pensent que le véhicule du trafic passe devant leur propre véhicule. Le temps de réponse est censé représenter le jugement perceptif du temps disponible avant l'arrivée du véhicule du trafic dans l'intersection. En utilisant ce type de paradigme, [Caird et Hancock \(1994\)](#) ont manipulé le type de véhicule du trafic (deux-roues motorisées, véhicule compact, véhicule large,

camionnette), le temps disponible réel avant l'arrivée du véhicule (1, 2, 3 ou 7 secondes) et la distance avant la suppression de la scène visuelle (30.5 ou 60.9 mètres). Les résultats ont montré que l'estimation du temps de passage^a était d'autant plus précise que le temps réel d'arrivée du véhicule du trafic était petit. L'expérience a également montré que le temps de passage était d'autant plus sous-estimé que la taille optique du véhicule du trafic était grande. Selon les auteurs, ces résultats sont en accord avec un principe de "sécurité" selon lequel les conducteurs auraient d'autant plus tendance à prendre une grande marge de sécurité pour leurs actions s'ils sont dans une situation plus "dangereuse". Cela semble être le cas pour des temps d'arrivée courts et des véhicules du trafic plus gros. Les auteurs identifient ce dernier effet comme le *Size Arrival Effect* (DeLucia, 1991). Selon eux, cet effet ne serait pas lié (du moins pas exclusivement) à une impression de dangerosité plus élevée des gros véhicules, mais à un biais dans la perception du temps de passage causé par la taille du véhicule du trafic. Dans une étude similaire, Manser et Hancock (1996) ont manipulé l'angle d'arrivée des véhicules du trafic. Les véhicules pouvaient arriver soit de façon perpendiculaire, soit de façon oblique (i.e., en face déporté sur la gauche). Les participants devaient estimer le temps de passage en gardant le regard droit devant eux. Les auteurs ont ainsi démontré qu'un angle d'approche oblique résultait en des estimations temporelles moins précises et ce particulièrement pour une vitesse d'approche lente des véhicules du trafic.

D'autres études ont essayé d'étudier la perception du temps de passage d'un véhicule du trafic en utilisant une scène visuelle en mouvement passif : le participant visualise la scène comme s'il était dans une voiture s'approchant d'une intersection sans avoir à en contrôler le déplacement. Là encore, un véhicule approche sur l'axe transversal de l'intersection et la scène visuelle disparaît avant que le participant n'atteigne l'intersection. Il est alors demandé aux participants d'indiquer s'ils pensent qu'ils auraient traversé l'intersection avant ou après le véhicule du trafic. Il s'agit donc ici de donner un jugement temporel relatif. Ce type de protocole a été utilisé, par exemple, pour mesurer l'estimation du temps de passage dans des approches curvilignes de différents rayons de courbure (Berthelon et Mestre, 1993), l'influence de la dépendance-indépendance à l'égard du champ (Berthelon et al., 1998) ainsi que l'effet de l'absorption de médicaments (Berthelon et al., 2003). Dans une étude prenant également en compte les mouvements oculaires, Van Loon et al. (2010) ont manipulé l'angle d'arrivée du véhicule du trafic (perpendiculaire ou oblique), sa trajectoire (rectiligne ou curviligne) ainsi que la vitesse d'approche du participant et du véhicule du trafic. Ces auteurs ont montré que les véhicules suivant une trajectoire en angle oblique (par rapport à l'angle perpendiculaire) donnent lieu à une perception du temps de passage nettement sous-estimée, particulièrement pour des temps d'arrivée réels élevés. Ces auteurs ont également montré que les mouvements oculaires horizontaux sont moins amples dans la situation d'arrivée oblique. Enfin, le fait que les participants utilisent la ligne de côté comme référence visuelle (nombre de fixations visuelles élevé) amène les auteurs à conclure que la distance entre le véhicule du trafic et la ligne de bord de voie pourrait donner une information sur l'imminence de l'arrivée de ce véhicule dans l'intersection.

Toutefois, les jugements perceptifs réalisés suite à une procédure de "disparition" de la scène visuelle semblent difficiles à interpréter. En effet, les processus cognitifs qui auraient lieu durant l'intervalle pendant lequel la scène visuelle a disparu sont largement inconnus ou peu documentés par les articles en question, or ce présupposé est essentiel pour l'interprétation des données. Par ailleurs, il n'existe pas d'évidences concernant la plausibilité d'une telle hypothèse dans ces conditions. Une discussion sur le

^a Temps avant le passage du véhicule du trafic devant la position du participant ou Time-To-Passage en anglais, à différencier du temps de pré-contact car il n'y a pas de collision entre l'observateur et le véhicule du trafic dans ces expériences.

paradigme de disparition peut être trouvée dans [Caird et Hancock \(1994\)](#).

D'autres études se sont concentrées sur les processus de prise de décision au moment de traverser une intersection, notamment pour la manœuvre de changement de direction à gauche et en fonction de différentes tailles d'intervalles libres du trafic. Dans ce type d'expériences, les participants sont la plupart du temps à l'arrêt à l'intersection face à un flux de trafic. Des créneaux temporels libres sont présents dans le flux de trafic et les participants doivent manifester (pression sur une commande) leur intention d'initier leur manœuvre de traversée. Par exemple, [Hancock *et al.* \(1991\)](#) ont mesuré la probabilité de prendre la décision d'effectuer la manœuvre de changement de direction à gauche en fonction du type de véhicule (deux-roues motorisées, véhicule compact, véhicule large, camionnette), de leur vitesse d'arrivée (de 16 à 113 km/h) et de l'intervalle de temps disponible entre deux véhicules du trafic (de 3 à 9 secondes). De même, [Dewing *et al.* \(1993\)](#) ont testé la probabilité d'initier une manœuvre de traversée en fonction du type de véhicule, de la vitesse d'arrivée des véhicules (56, 81, ou 105 km/h) et du temps disponible entre deux véhicules du flux de trafic (2, 4 ou 6 secondes). Les résultats ont montré que plus la vitesse des véhicules est élevée et plus la probabilité d'initier la manœuvre augmente. Cette probabilité augmente également avec l'augmentation du temps disponible dans la fenêtre intervéhiculaire. En revanche, la probabilité d'initier la manœuvre diminue avec l'augmentation de la taille du véhicule. Plus récemment, [Mohebbi et Gray \(2007\)](#), ont manipulé indépendamment la distance à l'intersection d'un véhicule du trafic et sa vitesse d'arrivée. Dans cette expérience les participants ne sont pas à l'arrêt et doivent réaliser leur manœuvre quand ils jugent pouvoir la faire. Cette expérience fait varier indépendamment la distance à l'intersection et le temps avant l'arrivée du véhicule du trafic. Les résultats ont montré que les participants n'utilisaient pas uniquement l'information temporelle pour prendre leur décision, mais une combinaison du temps disponible et de la distance. L'utilisation d'une stratégie fondée sur la distance n'est cependant pas optimale notamment quand cette distance est faible et la vitesse élevée ([Gray, 2004](#)).

Au final, ces études ont permis de mettre en évidence des facteurs affectant les jugements perceptifs comme la taille des véhicules du trafic, leur trajectoire et l'imminence de leur arrivée. Le comportement des conducteurs semble ainsi orienté vers des jugements et des prises de décision qui augmenteraient leur marge de sécurité si toutefois ceux-ci avaient effectivement réalisé la manœuvre. Cependant, nous pouvons mettre en évidence plusieurs limites à ces travaux. Tout d'abord, ces études n'explicitent que rarement le cadre théorique auxquelles elles se réfèrent. Ceci rend difficile l'inférence des processus cognitifs sous-jacents sur la base des comportements observés (voir la discussion sur le paradigme de disparition pour un exemple). Enfin, ces études ne permettent pas de connaître le comportement effectif des conducteurs dans la réalisation de leur manœuvre de traversée, ni même l'influence que pourrait avoir la réalisation active de la manœuvre sur leur perception de l'environnement. Ainsi, avant d'aller plus loin il nous semble nécessaire d'évaluer l'impact de la non prise en compte des processus moteurs sur notre compréhension de l'activité de conduite en intersection.

2.1.2 Les limites des tâches perceptives sans action

Globalement, les études que nous venons d'aborder se sont focalisées sur les processus perceptifs et sur les facteurs de déclenchement de l'action. Dans les situations utilisées, les participants sont soit à l'arrêt au niveau de l'intersection, soit en mouvement passif vers celle-ci. Ces recherches n'étudient donc pas l'interaction entre les processus perceptifs et moteurs et par conséquent, ne font pas intervenir l'analyse du comportement du conducteur dans son évolution temporelle. Pourtant, la séparation fonctionnelle

des processus perceptifs et moteurs dans la production du comportement est une hypothèse qui est discutable, particulièrement dans les activités visuellement guidées. Par ailleurs, dans leur discussion méthodologique, [Caird et Hancock \(1994\)](#) affirment que les études centrées sur les jugements perceptifs limitent la complémentarité fonctionnelle entre perception et action et orientent le comportement des participants vers "une réponse limitée à un événement limité" (cité du texte).

Par exemple, nous pouvons entrevoir l'influence positive de l'action sur la perception dans l'expérience de [Gray \(2004\)](#) : en effet, les participants devaient prendre la décision d'initier une traversée d'intersection avec changement de direction à gauche face à un véhicule arrivant dans l'intersection. Deux groupes sont formés, un groupe "actif" qui doit réaliser la manœuvre et un groupe "passif" qui doit simplement presser un bouton pour signifier son intention de réaliser la manœuvre. Les résultats (non significatifs toutefois) montrent que le groupe "passif" a tendance à prendre des décisions de réalisation de manœuvre dans des conditions moins sûres que le groupe "actif", c'est-à-dire quand le temps avant contact est inférieur au temps que prendrait la réalisation de la manœuvre.

De même, [Plumert et al. \(2004\)](#) ont étudié la façon dont des enfants à bicyclette traversent une rue face à un flux de trafic arrivant. Les participants devaient s'approcher de l'intersection, s'arrêter complètement et traverser celle-ci en choisissant une créneau temporel approprié. Bien que les participants devaient marquer le stop, très peu y sont parvenus : en fait, les adultes ayant le plus d'expérience de conduite à vélo sont les moins enclins à s'arrêter au niveau de l'intersection. Ces résultats laissent entendre que les adultes expérimentés préfèrent rester le plus possible en mouvement avant d'atteindre l'intersection, or ce fait est congruent avec les résultats de [Oudejans et al. \(1996a,b\)](#). Dans la même ligne de recherche, [Plumert et al. \(2011\)](#) ont montré que la répétition de la même tâche ([Plumert et al., 2004](#)) entraînait chez les enfants de moins de 12 ans une amélioration significative de la marge de sécurité prise au regard du créneau temporel (i.e., ils traversent plus loin du véhicule fermant le créneau) et les conduisait à choisir des créneaux plus difficiles. Le fait que la perception et l'utilisation des contraintes temporelles soient significativement améliorées sur un très court laps de temps grâce à la réalisation répétée de la manœuvre appuie, sous un angle différent, l'importance de la réalisation de l'action.

Dans leur étude, [Oudejans et al. \(1996b\)](#) ont montré que la production d'un mouvement préalable dans une tâche de traversée de carrefour par un piéton permettait à celui-ci d'agir sous de plus fortes contraintes temporelles. Ces auteurs ont conçu une expérience dans laquelle des piétons étaient soit arrêtés sur le bord du trottoir, soit en marche jusqu'à celui-ci avant de traverser ou non la rue en choisissant une fenêtre temporelle adaptée dans le flux de trafic. Les résultats ont montré que les participants choisissent des fenêtres temporelles significativement plus restreintes dans la condition de déplacement que dans la condition d'attente. Ces résultats ne mettent pas en cause la volonté des piétons à traverser la rue de façon sûre.^b Au contraire, de tels résultats signifieraient plutôt que la production de déplacement permet aux piétons une meilleure perception des contraintes de la situation et facilite ainsi la réalisation des tâches fortement contraintes.

Ces résultats viennent corroborer ceux obtenus par [Oudejans et al. \(1996a\)](#). Dans cette étude les auteurs ont exploré l'impact de la réalisation de l'action sur la précision de la perception des contraintes d'une tâche d'interception de balles. Deux expérimentations ont été proposées par les auteurs. Dans

^bCes résultats peuvent d'ailleurs être considérés comme contradictoires avec ceux de [Gray \(2004\)](#). Cependant, les deux tâches proposées sont très différentes : dans l'expérience de [Gray \(2004\)](#) les conducteurs devaient effectuer un changement de direction à gauche ce qui implique un ralentissement du véhicule et impose donc de prendre une plus grande marge de sécurité (en termes de temps disponible). Au contraire dans l'expérience de [Oudejans et al. \(1996b\)](#) les piétons devaient traverser droit devant eux, or dans ce cas l'absence de ralentissement rend moins nécessaire ce type de comportement sécuritaire.

chacune d'elles les participants devaient juger de la possibilité ou non d'intercepter une balle projetée en l'air. Ce jugement dépend de la cinématique de la balle et des capacités d'action de la personne voulant la récupérer. Cependant, la thèse de ces auteurs est qu'il n'est pas nécessaire de faire appel à des connaissances de ses capacités d'action stockées en mémoire pour réaliser un tel jugement. En effet, selon eux il existe des informations visuelles qui n'existeraient que quand l'observateur est en mouvement et qui informeraient celui-ci des contraintes liées à la tâche "en ligne" (i.e., au cours de la réalisation de la tâche). Autrement dit, le comportement observé pourrait être sous-tendu uniquement par ces informations détectées "en ligne" et non pas par des connaissances stockées en mémoire. Les auteurs ont mis à l'épreuve cette hypothèse dans leur première expérience portant sur des joueurs de champ experts et non-experts ("outfielders" en baseball) devant juger de la possibilité d'intercepter une balle soit à l'arrêt ou en mouvement. Les résultats indiquent d'une part que l'expertise ne joue pas de rôle sur la précision des jugements et d'autre part que le fait d'être en mouvement améliore la perception des contraintes temporelles liées à la tâche. Ces résultats suggèrent fortement que les joueurs n'utilisent pas des "connaissances" stockées en mémoire mais plutôt des informations visuelles perceptibles "en ligne" durant le mouvement. Dans leur seconde expérience, des participants devaient juger de la possibilité d'intercepter des balles de tennis projetées par une machine. Les participants étaient impliqués dans trois conditions expérimentales. Dans la condition "Attente" les participants observaient l'approche de la balle qui était masquée une seconde avant qu'elle n'atteigne son point d'arrivée. Dans la condition "Mouvement" les participants initiaient leur action d'interception et la scène visuelle était également masquée une seconde avant que la balle ne termine sa trajectoire. Enfin, dans la condition "Interception" ils devaient réaliser l'interception réellement, sans contraintes particulières. Dans les deux premiers cas, les participants devaient dire s'ils auraient pu ou non intercepter la balle depuis son lancé. Les résultats montrent là encore que les jugements sont plus précis dans la condition de mouvement que dans la condition d'attente.

Ces résultats viennent conforter ceux obtenus par [Bootsma \(1989\)](#). Cet auteur a montré que la perception des contraintes temporelles associées à une tâche de frappe de balle dépendait fortement du système moteur utilisé pour réaliser la tâche. Dans cette expérience, les participants devaient frapper une balle tombant vers le sol soit en utilisant leur bras ou une batte, soit en appuyant sur un bouton pour déclencher le mouvement d'un bras mécanique, en jugeant de l'instant auquel ils devraient initier le mouvement avec leur bras ou le bras mécanique. Les résultats montrent premièrement que les participants ont plus de difficultés à réaliser la tâche de jugement que la tâche de frappe réelle. Ceci corrobore encore une fois l'importance de l'action dans la perception des contraintes d'une tâche. Les résultats montrent également que la variabilité de l'instant de la frappe de balle est plus basse avec le bras réel qu'avec le bras mécanique. Ce dernier résultat est particulièrement intéressant si l'on considère que le mouvement du bras mécanique est moins variable qu'un bras humain (le mouvement est toujours le même, seul le temps d'initiation dépend des participants). De plus, la variabilité du temps total de frappe de balle avec le bras est plus faible que la somme de la variabilité du temps d'initiation et du temps de mouvement dans la même condition. Ainsi, la plus grande variabilité des sous-composantes motrices permet, dans leur ajustement mutuel, la production d'un mouvement global plus adapté aux contraintes temporelles de la tâche. Ces deux derniers résultats permettent d'affirmer que la synchronisation d'un mouvement de frappe avec le mouvement d'une balle est le résultat d'un processus impliquant l'intégration des contraintes motrices dans la perception de l'environnement.

L'ensemble de ces résultats nous apprend que non seulement la réalisation effective d'une action

modifie la perception des contraintes de la tâche mais aussi, que l'action a une influence positive (elle permettrait une perception plus précise des contraintes de la tâche et une réalisation de la tâche sous des contraintes plus élevées) voire nécessaire car certaines informations n'existent que dans la réalisation d'un déplacement (Oudejans *et al.*, 1996a). Dans leur ensemble ces résultats suggèrent donc que la séparation des processus perceptifs et moteurs n'est pas une situation "écologique" pour étudier les activités visuellement guidées (au sens de comparable avec l'activité quotidienne d'un être humain). Ils suggèrent également que la séparation de ces deux types de processus est un parti pris théorique quant à la notion d'information perceptive qui n'est pas nécessaire et même peut-être même non souhaitable. Ces considérations nous amènent ainsi à choisir pour la suite de notre travail une théorie de l'information adaptée à ce type d'activité et qui postule un lien fonctionnel fort entre la perception et l'action.

2.2 Explicitation et choix d'une théorie de l'information

2.2.1 Les limites d'une définition de l'information sans action

Avant d'aller plus loin dans notre travail, il est nécessaire de s'entendre sur la notion d'information qui est centrale et dont la définition dépend de certaines prises de positions théoriques. La notion d'information est centrale car c'est l'information qui donne accès aux propriétés de l'environnement et aux contraintes de la tâche, et c'est sur la base des informations relatives à l'environnement que les conducteurs doivent ajuster leur comportement. Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, les principales études sur les traversées d'intersections semblent fondées sur une théorie de l'information indépendante de l'action alors que les études sur les tâches visuellement guidées suggèrent fortement l'inadéquation d'un tel cloisonnement fonctionnel entre perception et action.

La théorie de l'information utilisée dans les études antérieures (cf., Section précédente) est souvent peu (ou même pas du tout) explicitée. Il nous est cependant nécessaire de clarifier les implications du postulat de séparation fonctionnelle entre perception et action. Le paradigme théorique le plus général dans lequel s'inscrit ce postulat est celui de la théorie computationnelle-représentationnelle de la cognition (Neisser, 1967). Cette théorie définit le système cognitif comme étant un système de traitement de l'information (Shannon, 1948) dont la vocation est de construire une représentation interne de l'environnement pour agir de façon adaptée au sein de celui-ci. Les modèles issus de cette théorie supposent globalement une exécution séquentielle de sous-tâches : (1) extraction des informations les plus justes et les plus exhaustives concernant l'état du monde, (2) élaboration d'une représentation interne du monde, (3) manipulation de ces représentations internes afin de prendre une décision d'action et enfin (4) production de l'action. Un tel modèle général a été utilisé dans différentes analyses cognitives de l'activité de conduite comme c'est le cas dans Neboit (1977, voir aussi la figure 2.2.1). Appliqué à la conduite, ce modèle propose que le conducteur réalise séquentiellement un certain nombre de sous-tâches : la détection des informations pertinentes pour la conduite (obstacles, panneaux, feux), leur extraction (vitesse de déplacement, lettres sur les panneaux, couleur du feu), leur interprétation pour obtenir un modèle interne de la situation (le conducteur sait par exemple qu'il est sur la voie non prioritaire d'une intersection, qu'une voiture arrive et qu'après son passage il devra prendre à gauche pour continuer son itinéraire) et enfin la réalisation de l'action (freinage pour laisser passer le véhicule du trafic, puis accélération et rotation du volant sur la gauche). Dans le cadre des expériences étudiées dans la Section 2.1.1, il est clair que le paradigme de disparition est fortement adossé à ce type de théories. La prédiction du temps de passage dans l'intersection du véhicule du trafic après sa disparition doit nécessairement reposer sur

une représentation interne de la situation et sur une “simulation” mentale de celle-ci.

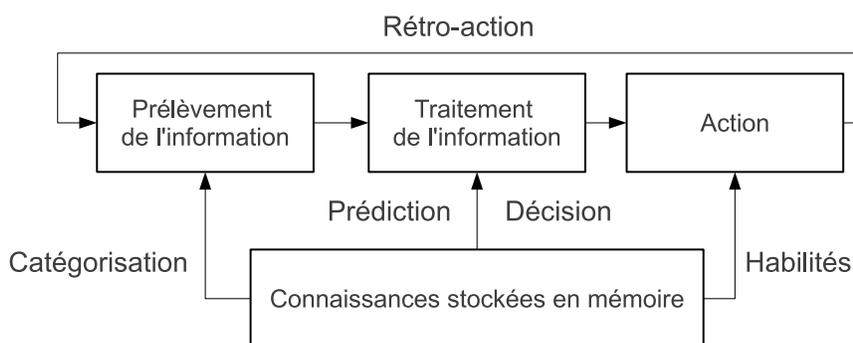


FIGURE 2.2.1 – Schéma inspiré de [Neboit \(1977\)](#) décrivant le fonctionnement cognitif du conducteur. Nous pouvons constater que le “pivot” de la cognition est constitué par les traitements centraux de haut niveau, tandis que la perception et l’action sont deux processus auxiliaires situés des deux côtés du déroulement temporel de l’activité.

Une telle approche est particulièrement utile pour décrire l’architecture fonctionnelle globale du conducteur. En effet, la métaphore du système de traitement de l’information permet d’élaborer un modèle du conducteur qui recense les informations à prendre en compte pour réaliser une tâche, les traitements qui doivent être réalisés ainsi que leur moment d’occurrence ([Rasmussen, 1983](#)). Par exemple, [Van Elslande \(2001\)](#) propose un modèle séquentiel des défaillances possibles du conducteur, qui s’échelonnent de l’acquisition des informations à leur utilisation. [Richard \(2006\)](#), propose également une décomposition séquentielle en sous-tâches que le conducteur doit accomplir lors d’une traversée d’intersection contrôlée par un feu. Enfin, le modèle d’architecture cognitive le plus généraliste du conducteur automobile est ACT-R (Adaptive Control of Thought—Rational, [Salvucci et al., 2001](#); [Salvucci, 2006](#)) qui permet de simuler un ensemble de “modules” cognitifs (par exemple la direction de l’attention ou le contrôle de la position latérale sur la route) qui opèrent de façon plus ou moins encapsulée et séquentielle.

De façon générale, ces modèles rendent plus compte du traitement et de la communication de l’information que de l’information elle-même. En effet, ils ne donnent pas d’explications concernant le choix d’une information ou d’une autre par le conducteur, ils n’explicitent pas plus les raisons pour lesquelles cette information est pertinente pour la réalisation de la tâche. Ils sont donc particulièrement efficaces quand il s’agit de décrire les traitements effectués sur les informations supposées être perçues par les conducteurs. Ces modèles peuvent donc permettre une étude adéquate des processus dits de “haut niveau” comme la prise de décision, la compréhension ou l’interprétation de la situation. En revanche, ils semblent moins adéquats quand il s’agit d’étudier la perception d’information au plus bas niveau de l’activité.

Nous pourrions résumer ce qui précède en disant que cette théorie est caractérisée par deux aspects qui nous intéressent particulièrement. D’une part, la perception et l’action sont conçues comme deux extrémités disjointes de l’activité cognitive. La “phase” perceptive préparerait le comportement du conducteur tandis que la “phase” motrice la finaliserait. D’autre part, le mécanisme présidant à la sélection des informations pertinentes reste peu explicite. De plus, la façon dont ces informations sont extraites des données sensorielles fait appel à la constitution de représentations internes dont la vocation serait de compenser la “pauvreté” en information de celles-ci. En effet, les représentations internes auraient pour vocation de fournir une description de l’environnement plus ou moins abstraite (i.e., in-

dépendante des entrées sensorielles). Un corollaire de ce dernier point est que la constitution de telles représentations nécessiterait de nombreuses opérations intermédiaires, ce qui aurait un coût en terme de temps d'adaptation.

Si l'on tente de rapprocher cette théorie de l'information perceptive des contraintes de la conduite en intersection, il nous semble alors qu'elle ne nous permettrait pas de faire des hypothèses parcimonieuses sur le comportement du conducteur. En effet, comme nous l'avons déjà souligné, la conduite est une activité nécessitant la coopération continue de la perception et de l'action et qui est soumise à de fortes pressions temporelles. Les deux caractéristiques citées plus haut semblent donc difficilement compatibles avec le type de comportement qui nous intéresse. Ces deux caractéristiques théoriques ont par ailleurs été critiquées plus largement dans la littérature scientifique. Concernant le premier point, l'existence de processus permettant d'extraire une représentation *signifiante* pour l'acteur de la situation reste difficile à démontrer et à implémenter (Brooks, 1991; Fodor, 2001; Searle, 1981; Turvey et Shaw, 1979; Turvey, 1977). Concernant le second point, la construction d'une représentation juste et exhaustive du monde pose le problème du temps dans lequel un système de traitement de l'information peut réaliser ce type de tâche. En effet, le nombre de traitements nécessaires pour passer d'une entrée sensorielle pauvre à une représentation satisfaisante de l'environnement semble ne pas être adapté en terme de contraintes temporelles et de prise en compte des changements de l'environnement (Brooks, 1991).

Au final, ces deux problèmes sont liés à l'exigence d'un fonctionnement fondé sur des représentations qui servent de médiateurs entre perception et action. En fait, dans le domaine des actions visuellement guidées, une théorie alternative a été préférentiellement adoptée, celle de la perception directe (Gibson, 1986; voir aussi Turvey, 1977; Michaels et Carello, 1981). Cette théorie ne postule pas le cloisonnement fonctionnel de la théorie classique de l'information perceptive et pourrait donc être particulièrement adaptée à notre étude. Sans toutefois remettre en cause la légitimité de la théorie classique de l'information quand il s'agit d'étudier les processus cognitifs de "haut niveau", nous pensons cependant qu'il est préférable d'opter pour une théorie de l'information qui s'affranchit des critiques que nous avons abordées. A cet égard, le modèle ACT-R implémente des hypothèses théoriques de natures différentes en fonction des différents niveaux d'abstraction des processus étudiés (Salvucci *et al.*, 2001; Salvucci, 2006). Nous présentons dans la section suivante la manière avec laquelle la théorie de la perception directe pourrait apporter des réponses adaptées aux questions que pose le contrôle d'un véhicule à l'approche d'une intersection.

2.2.2 Définition de l'information selon la théorie de la perception directe

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, la théorie classique de l'information perceptive s'adapte difficilement aux contraintes du niveau d'analyse de la situation dans lequel nous nous plaçons. Pour mener notre analyse du comportement perceptif et moteur des conducteurs en intersection, nous devons utiliser un cadre théorique qui nous permette une explication parcimonieuse de ce comportement. Cette théorie devra mettre l'accent sur la capacité du système perceptif humain à utiliser des informations à la fois fiables et facile d'accès (en termes d'économie de traitement) et qui mettent en valeur la coopération constante en perception et action dans la production d'un comportement efficace et sûr. Nous allons montrer dans cette section comment la théorie de la perception directe (Gibson, 1986) permet de tenir compte de telles contraintes.

Les deux principales difficultés de la théorie classique du traitement de l'information sont la nécessité de créer des représentations du monde et de les traiter dans un temps raisonnable. Ces deux

difficultés sont liées à deux postulats fondamentaux à propos desquels la théorie de la perception directe se différencie significativement. En effet, cette dernière ne postule ni la séparation stricte de l’animal et de son environnement, ni celle de la perception et de l’action. Selon cette théorie, la cognition n’existerait que dans l’interaction entre l’animal et son environnement : en fait, la cognition serait distribuée entre l’organisme (c’est-à-dire le corps entier de l’animal et ses capacités d’action) dont l’étude isolée aurait trait à la physiologie et l’environnement (avec les opportunités d’action qu’il offre et les contraintes qu’il impose) dont l’étude isolée aurait trait à la physique. Sans nous étendre sur les implications épistémologiques que ces postulats soulèvent, nous pouvons mettre en avant une de leurs conséquences théoriques qui nous intéresse en premier lieu : cette théorie fait l’hypothèse d’une perception sans nécessité de faire intervenir le concept de représentation ni de traitements intermédiaires sur ces représentations. En effet, l’élaboration des représentations a pour vocation de permettre l’extraction d’informations abstraites à propos de l’environnement à partir de données sensorielles peu informatives. Pourtant, selon [Gibson \(1986\)](#) le contenu informationnel des patrons d’énergie lumineuse parvenant à l’agent est sous-estimé dans les approches classiques de la perception visuelle. Montrons comment cette théorie peut s’affranchir de la nécessité des représentations tout en donnant une explication parcimonieuse aux phénomènes perceptifs.

Pour expliquer la perception visuelle, la théorie de la perception directe ([Gibson, 1986](#)) fait appel au concept central de champ optique (“optical array”). Le champ optique est défini par l’ensemble des rayons lumineux, réfléchis par les surfaces qui composent l’environnement, qui se croisent au point d’observation d’un *agent* (i.e., un organisme situé et agissant dans un environnement). Ce concept s’oppose à celui d’image rétinienne qui est composée de points lumineux stimulant ponctuellement les récepteurs de la rétine. Bien que nécessaire, l’image rétinienne ne constitue pas, selon cette théorie, la perception en soi. Si les faisceaux lumineux sont des *stimuli* pour la rétine, seule leur structuration globale constitue une *information* pour l’agent. En effet, les rayons lumineux dans le champ optique sont structurés, à un point d’observation donné, par leur réflexion sur les surfaces de l’environnement. Autrement dit, la *lumière ambiante* (“ambient light”) diffusée par les sources lumineuses primaires (i.e., principalement le soleil) n’est porteuse d’information que par la façon dont celle-ci est organisée par la structure de l’environnement lui-même. [Gibson \(1986\)](#) prend l’exemple de la diffusion de lumière ambiante au travers d’un épais brouillard : dans ce cas, la diffusion des rayons lumineux est homogène dans toutes les directions de l’espace et bien que la lumière stimule la rétine, elle n’est pourtant pas porteuse d’information. Une structure est donc une organisation globale et spécifique des rayons lumineux dans le champ optique de l’agent. Ainsi, selon [Gibson \(1986\)](#), l’environnement visuel est d’emblée riche en information car le fait que le champ optique soit structuré par les propriétés de l’environnement rend non nécessaire l’extraction d’informations supplémentaires depuis l’image rétinienne. La notion de structure est ainsi au cœur de la définition de l’information dans la théorie de la perception directe :

“as Gibson uses the term, information is structure that specifies an environment to an animal. It is carried by higher-order patterns of stimulation—neither points of light nor collections of such points (images)—but, rather, complex structures often given over time. These patterns are information about the world.” [Michaels et Carello \(1981\)](#).

Un autre concept essentiel est celui de *flux optique* (“optical flow”) : comme l’agent est actif dans son environnement, son point d’observation change au cours du temps et le contenu du champ optique de l’agent change continuellement. La théorie de la perception directe parle alors de *système perceptif* dans la mesure où la perception est contrôlée par les mouvements de l’agent. Si nous prenons l’exemple de

l'Homme, les yeux peuvent bouger dans leurs orbites, les yeux sont situés dans une boîte crânienne, elle aussi mobile, située à son tour sur un tronc qui peut se déplacer dans l'environnement. Ainsi, les changements d'état de l'environnement et les mouvements de l'agent produisent des variations dans le flux optique. Pourtant, les patrons d'énergie lumineuse contenus dans le flux optique présentent des relations persistantes au-delà d'une situation donnée et ce sont ces relations qui constituent une information au sens de la théorie de la perception directe. Cette hypothèse se retrouve dans le concept *d'invariant*. Il existe alors deux types d'invariants : les *invariants de structure* et les *invariants transformationnels*.

Un exemple d'invariant de structure peut être trouvé dans les stimuli de [Johansson \(1973\)](#). Ces stimuli correspondent à des points lumineux placés sur les articulations d'un individu marchant debout. L'individu est habillé en noir et la capture d'image est faite dans l'obscurité de telle sorte que seuls les points lumineux restent visibles au final. Sur une image fixe, l'ensemble formé est peu informatif : elle correspond à un ensemble désordonné de points lumineux. En revanche, sur la vidéo, où l'on voit l'individu qui se déplace, le mouvement consécutif des points lumineux "révèle" la structure qui les supporte. En d'autres termes, par les variations d'emplacement des points lumineux, il devient perceptible que certains points n'ont pas de relation constante entre eux, tandis que d'autres sont toujours associés par les mêmes relations géométriques. Les relations invariantes entre certains points lumineux *spécifient* (i.e., donne une information à propos de quelque chose) la structure qui les supporte. Ces invariants spécifient un état particulier de l'environnement.

Par ailleurs, quand l'agent est en mouvement dans l'environnement il produit des transformations du flux optique qui sont à la fois liées à son action et aux changements de l'environnement lui-même : ce sont les invariants transformationnels. En effet, dans la théorie de la perception directe la perception est conçue comme étant un phénomène circulaire.

“control” is not something that exists in the animal as a consequence of perception. It cannot be said that the optics change first and the act is in response to that. During an activity, the actor and the optic array are continually changing. What is usually taken as evidence of control is merely a necessary consequence of the natural fit between perception and action.” [Fitch et Turvey \(1978\)](#).

Ainsi, tandis que les invariants de structure spécifient une propriété de l'environnement, les invariants transformationnels spécifient un état du *système agent-environnement* (i.e., la relation qui unit l'agent actif à son environnement). Pour illustrer ce concept d'invariant transformationnel, prenons l'exemple de la spécification du rapprochement entre un agent et un objet qui lui fait face. Comment le système perceptif d'un agent peut-il distinguer une situation dans laquelle l'agent s'approche d'un objet immobile, de celle dans laquelle c'est l'agent qui est immobile et l'objet qui se rapproche ? Du point de vue de la stimulation rétinienne, les deux situations sont équivalentes puisque dans les deux cas l'ensemble des points lumineux associés à l'objet forment un région de plus en plus étendue sur la rétine. Le système perceptif doit donc utiliser, parmi les variations de flux optique, des invariants qui viennent spécifier les déplacements propres de l'agent ou de l'objet. Pour [Turvey \(1977\)](#), quand un agent s'approche d'un objet, l'angle visuel sous-tendu par celui-ci augmente progressivement au cours de l'approche en même que les autres éléments du flux optique (autres objets dans le paysage). En revanche, si c'est l'objet qui approche de l'agent, seul l'angle visuelle sous-tendue par celui-ci grandit au fur et à mesure de son approche sans autres variations dans le reste du flux optique. Cet exemple illustre que les invariants transformationnels peuvent spécifier des changements d'états qui auraient été très difficile à discriminer si nous avons considéré la seule entrée rétinienne.

Ces exemples mettent en évidence que pour la théorie de la perception directe il existe toujours (indépendamment de la complexité du phénomène) un invariant spécifique à un état du système agent-environnement :

“At some level of analysis, there necessarily exists information that is specific to its source.”

[Turvey *et al.* \(1978\)](#).

Au final, ce que nous devons retenir de la définition de l’information dans le cadre de la théorie de la perception directe est que l’information visuelle est caractérisée par une structure invariante contenue dans le patron d’énergie lumineuse, que ces invariants spécifient les états particuliers du système agent-environnement, et enfin que l’exploration active (au sens de production de déplacement) de l’environnement permet la détection d’invariants contenus dans le flux optique. Autrement dit, non seulement les informations contenues dans le flux optique sont d’emblée “riches”, c’est-à-dire qu’elles ne nécessiteraient pas d’être complétées ou améliorées mais l’action joue également un rôle fondamental dans la perception de l’environnement.

“The idea that action sets up perception means that the organization of the action system can constrain the form and timing of its own regulation.” [Kugler *et al.* \(1980\)](#).

Dans la Section [2.1.1](#) nous avons considéré l’activité de conduite comme une action visuellement guidée et dans la Section [2.1.2](#) nous avons souligné l’influence positive de l’action sur la perception dans ce type d’activité. Dans cette section nous avons montré que la théorie de la perception directe apporte un cadre parcimonieux pour expliquer le contrôle visuellement guidé du comportement. Dans la section suivante nous tâcherons de montrer comment ces concepts théoriques peuvent être articulés avec la tâche de conduite qui nous intéresse.

2.2.3 L’invariant comme information : dans quel but et comment l’utiliser ?

Dans la section précédente nous avons explicité le concept d’information visuelle tel que nous allons l’utiliser dans ce travail. Ainsi, pour nous l’invariant spécifie une propriété du système agent-environnement ; il devient une information dès lors que l’agent est en mesure de le détecter et de l’utiliser. Nous montrerons dans cette section comment l’information visuelle peut être utilisée par un conducteur dans une situation de traversée d’intersection. Nous retrouvons ici notre questionnement initial qui porte sur la compréhension de la stratégie perceptivo-motrice mise en œuvre par les conducteurs lors d’une traversée d’intersection. Dans ce cadre nous devons nous poser la question du but dans lequel l’information va être utilisée et comment elle va être utilisée. Ces deux aspects sont essentiels dans la compréhension du comportement perceptivo-moteur d’un agent et plus particulièrement celui du conducteur automobile.

Dans le contexte de la conduite automobile, ces deux aspects sont particulièrement bien illustrés dans le concept de champ de conduite sécurisé (“Field of Safe Travel”, FST) proposé par [Gibson et Crooks \(1938\)](#). Selon ces auteurs, le conducteur percevrait, à chaque instant, un champ formé par l’ensemble des trajectoires qu’il est possible de parcourir sans danger (Figure [2.2.2](#)). Ce champ serait défini et se modifierait en fonction des capacités d’action du conducteur médiées par son véhicule (e.g., capacités d’accélération et de freinage) et les opportunités d’action offertes par l’environnement (e.g., géométrie de l’infrastructure, obstacles fixes et mobiles, temps et espace disponibles). Les bornes du FST spécifient les limites d’action possibles (vers quels buts l’action peut-elle se diriger), tandis que chaque trajectoire à l’intérieur du FST spécifie une action potentielle dans ses dimensions spatiales et temporelles (quelle

trajectoire le conducteur peut-il emprunter parmi les actions possibles). Ainsi, si nous découpons le problème de façon plus explicite, le comportement d'un agent impliquera d'une part, un choix du mode d'action relativement aux possibilités d'action et d'autre part, un contrôle de l'action telle qu'elle a été choisie par l'agent (Warren, 1988). Le premier aspect du comportement est sous-tendu par une information-pour (“*information-for*”) tandis que le deuxième aspect est sous-tendu par une information-à-propos (“*information-about*”, Michaels et Carello, 1981).

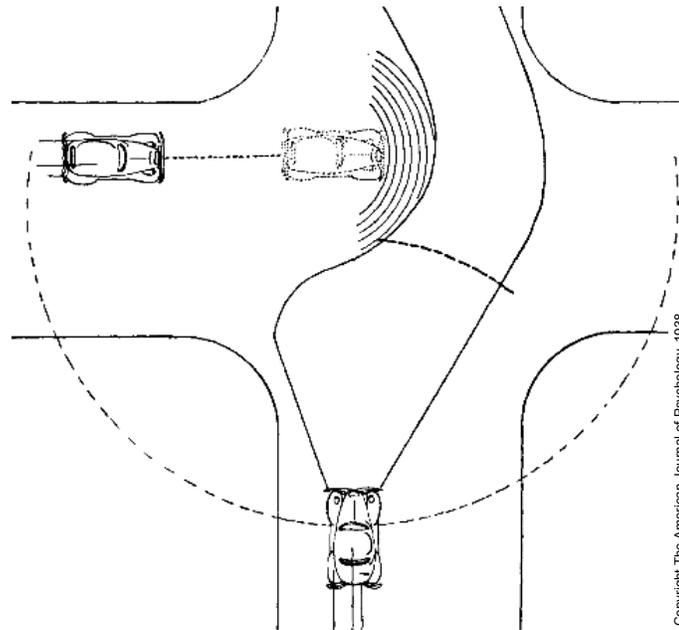


FIGURE 2.2.2 – Illustration du FST de Gibson et Crooks (1938). Le conducteur étudié est en bas. La zone qui se “déforme” au passage du véhicule entrant dans l’intersection illustre comment le conducteur pourrait percevoir les trajectoires possibles pour sa traversée.

Le premier type d’information définit l’environnement perçu tel qu’il est utilisable pour un agent donné. En effet, un environnement offre des opportunités d’action qui ne sont valables que pour un organisme donné (buts poursuivis, systèmes sensoriels et moteurs, cf. Von Uexküll, 1965) et qui pour un même organisme dépend de ses capacités d’action (force motrice disponible, dimensions des segments corporels). Les informations “pour” pour un agent donné dans un environnement donné spécifient la possibilité de réaliser une action. Cette possibilité d’action perçue par l’agent est appelée une *affordance* (Gibson, 1977). Par exemple, en présence d’une intersection régulée par un stop, si le flux de trafic laisse apparaître un créneau suffisamment grand (en termes de temps disponible entre deux véhicules) au regard des capacités de déplacement du conducteur (vitesse initiale, accélération), nous disons que la situation “afforde” le franchissement de l’intersection à l’intérieur de ce créneau du trafic (après l’arrêt du conducteur au stop). Si le créneau n’était pas suffisamment grand, la situation “afforderait” le maintien en position arrêtée du véhicule. Nous voyons ici clairement que les informations-pour et les affordances qu’elles définissent autorisent la sélection d’un mode d’action approprié.

De façon complémentaire, le deuxième type d’information caractérise les propriétés du système agent-environnement de manière à permettre à l’agent d’agir de façon adaptée dans le décours de son activité. Pour reprendre notre exemple précédent, si le conducteur choisit le mode d’action “traverser à l’inté-

rieur du créneau libre du trafic”, il va devoir utiliser des informations à même de caractériser l’état du système agent-environnement qui lui permettront d’atteindre ce but. Ces informations seront relatives aux contraintes spatiales et temporelles qui unissent les différents acteurs du système. Dans le décours de l’activité du conducteur, les variations de l’information visuelle utilisée par celui-ci vont l’amener à produire des ajustements comportementaux (e.g., pression sur les pédales, rotation du volant) afin d’arriver dans l’état qu’il cherche à atteindre (i.e., déplacement du véhicule de façon sécurisée). Nous pouvons donc dire que les informations à-propos donnent lieu au contrôle adapté et continu de l’action en fonction des états du système agent-environnement.

Cette revue de question nous a permis d’évoquer deux composants d’une stratégie perceptivo-motrice (voir aussi la Figure 2.2.3) telle que nous la concevons dans ce travail. Le premier est l’affordance (information-pour) qui oriente l’agent vers un mode d’action particulier (i.e., le but), le second est l’information à-propos du système agent-environnement que l’agent va utiliser pour contrôler son déplacement. Comme nous l’avons annoncé dans notre questionnement initial (cf., Section 1.2), nous nous intéressons particulièrement aux processus perceptifs et moteurs qui permettent le contrôle du véhicule dans une tâche de traversée d’intersection. Nous nous focaliserons donc plus sur le contrôle continu de l’action dans cette tâche plutôt que sur les processus de sélection du mode d’action qui lui sont préalables. Aussi, nous aborderons dans les sections suivantes comment nous pouvons étudier expérimentalement le contrôle continu du déplacement d’un véhicule dans le cadre de la traversée d’intersection.

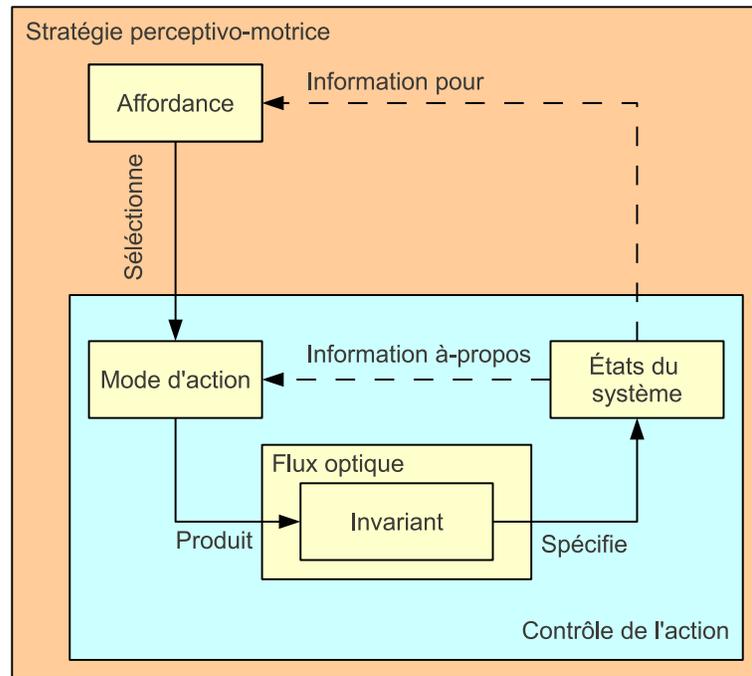


FIGURE 2.2.3 – Relations entre les différents éléments conceptuels d’une stratégie perceptivo-motrice. Le contrôle est constitué par l’interaction entre un mode d’action (sélectionné par une affordance), un invariant et un état du système agent-environnement. Ces trois éléments sont “objectivables” c’est-à-dire qu’ils peuvent être mesurés dans la situation étudiée, tandis que la notion d’information ne peut être décrite que relativement à un agent agissant dans son environnement.

2.3 Analyse du contrôle continu dans l'activité de traversée d'intersection

2.3.1 La relation entre mouvement et invariant : la notion de loi de contrôle

Nous avons vu dans la section précédente qu'un invariant devenait une information quand il était effectivement utilisé dans l'activité perceptivo-motrice de l'agent. Nous avons également abordé comment ces concepts pouvaient s'articuler avec les contraintes de la conduite automobile et en particulier avec celles de la conduite en intersection. Nous avons également délimité notre champ d'investigation à celui du contrôle continu de l'action, c'est-à-dire de l'utilisation d'un invariant dans le cadre du contrôle visuellement guidé de l'action (information-à-propos). Pour étudier expérimentalement ce type de contrôle, introduisons la notion de loi de contrôle. Cette notion a été développée par Warren (1988) et représente une description mathématique de la relation circulaire entre processus perceptifs et moteurs. La force des lois de contrôle est qu'elles permettent de modéliser la relation agent-environnement pour des agents de nature très diverses : par exemple Duchon et Warren (1994) et Srinivasan (1998) ont montré que malgré des systèmes nerveux et biomécaniques très différents des robots et des abeilles (respectivement) peuvent réaliser les mêmes tâches que les humains en se fondant sur la même relation circulaire entre information et mouvement (cf., le concept de cycle information-mouvement de Bootsma, 1998). Warren (1988) définit d'une part, la *loi d'optique écologique* qui rend compte de la production du flux optique consécutif à une production de force (Équation 2.3.1) et d'autre part, il définit la *loi de spécification*, qui spécifie l'ensemble des forces appliquées sur l'agent en fonction des caractéristiques du flux optique (Équation 2.3.2).

$$flux = f(Force) \quad (2.3.1)$$

$$Force = g(flux) \quad (2.3.2)$$

Les forces appliquées sur l'agent peuvent être d'origine interne, si c'est l'agent qui produit un mouvement (i.e., le cas qui nous intéresse) ou externe si la force n'est pas produite par l'agent lui-même (e.g., la gravité). Ainsi, la *loi de contrôle* peut se définir comme la relation entre un différentiel de production de force par l'agent et un différentiel d'information perçue (Équation 2.3.3).

$$\Delta F_{int} = g(\Delta flux) \quad (2.3.3)$$

Ainsi, ces formulations mathématiques permettent de mettre en relation explicitement la production de mouvement et un invariant contenu dans le flux optique. Warren (1988) propose un exemple concret de mise en œuvre d'une loi de contrôle pour illustrer son propos. Il analyse le contrôle de la course à pied et en particulier le contrôle de la longueur d'une foulée (i.e., deux poses consécutives d'un pied au sol). Après avoir fait varier différents paramètres de la situation (e.g., distance totale de la foulée, vitesse de déplacement), cet auteur a mis en évidence que le paramètre physique qui explique le mieux la longueur d'une foulée était le temps de vol total entre deux poses d'un pied au sol ($\Delta t = t_2 - t_1$, avec respectivement t_1 et t_2 les deux instants de pose d'un pied à venir). Or, il montre aussi que le temps de vol est directement déterminé par l'impulsion verticale produite par le coureur dans sa foulée (I). Le contrôle

de la longueur de foulée est donc contrôlée par une relation mathématique entre l’impulsion verticale I (le paramètre moteur) et le temps désiré entre deux poses du pied Δt (le paramètre informationnel). Pourtant, Δt ne constitue pas à proprement parler une information pour le coureur (cf., Section 2.2.2). En revanche, le coureur peut avoir accès au temps désiré entre deux foulées par l’intermédiaire du taux d’expansion optique τ du prochain emplacement où poser le pied (Lee, 1976, voir aussi la Section 2.3.2 et le Chapitre 6). En effet, cet invariant optique spécifie le temps de pré-contact avec un objet en approche, ainsi le temps total de la foulée désiré peut être calculé comme le différentiel entre les temps de pré-contact des deux prochaines cibles au sol (i.e., sur lesquelles le coureur doit poser les pieds), ce qui donne : $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$. En mettant tous ces éléments ensemble Warren (1988) propose que la loi qui contrôle la longueur d’une foulée soit la suivante :

$$I = mg\Delta\tau \tag{2.3.4}$$

Où mg est une constante liée à la force gravitaire. L’Équation 2.3.4 représente ainsi une illustration de la notion de loi de contrôle représentée par l’Équation 2.3.3. De façon plus générale, nous pouvons simplifier les formalisations futures en faisant abstraction de la production de force pour ne retenir que la cinématique consécutive de celle-ci (Warren, 2006). Dans ce cas (Équation 2.3.5), la loi de contrôle met en relation la dérivée d’un paramètre moteur (\dot{a}) avec un paramètre informationnel (i).

$$\dot{a} = \psi(a, i) \tag{2.3.5}$$

Il devient alors clair que les prochaines étapes dans notre travail seront d’une part d’identifier la ou les informations visuelles (i) qui impactent la vitesse de déplacement du véhicule (\dot{a}) et d’autre part de déterminer les modalités de prise en compte de cette information à des fins de régulation (i.e., ici la fonction ψ). A cet égard, les lois de contrôle ont été abondamment étudiées dans le champ des actions visuellement guidées. Créer un pont théorique entre ce domaine et celui de la conduite nous permettrait de proposer des hypothèses théoriquement fondées sur la façon dont les conducteurs modulent leur vitesse à l’approche d’une intersection. Ainsi, nous proposons dans la section suivante une analogie entre tâche de traversée d’intersection et celle d’interception de mobile se déplaçant horizontalement.

2.3.2 S’intégrer dans le trafic d’une intersection : une tâche d’interception ?

La traversée d’intersection partage des caractéristiques communes avec les tâches d’interception de mobile se déplaçant horizontalement (i.e., sur le plan du sol). En effet, elle implique un croisement de trajectoires et l’interception d’une fenêtre spatio-temporelle en mouvement. La tâche de traversée d’intersection à l’intérieur d’un créneau du trafic pourrait consister en une généralisation de la tâche d’interception de mobile à une échelle spatio-temporelle plus grande (voir aussi la Figure 2.3.1). L’interception d’un ballon par exemple implique d’agir dans une fenêtre de réalisation de la tâche étroite (de l’ordre du centimètres) tandis qu’intercepter un créneau du trafic implique une fenêtre beaucoup plus large (de l’ordre de plusieurs mètres). De ce point de vue, il nous semble intéressant de mener une revue de littérature concernant ce domaine.

Lenoir *et al.* (1999) ont tenté d’identifier la variable informationnelle utilisée dans une situation d’interception de balle se déplaçant horizontalement. Selon les auteurs, le taux de changement de l’angle de relèvement serait un invariant particulièrement pertinent pour le contrôle de l’interception. En effet,

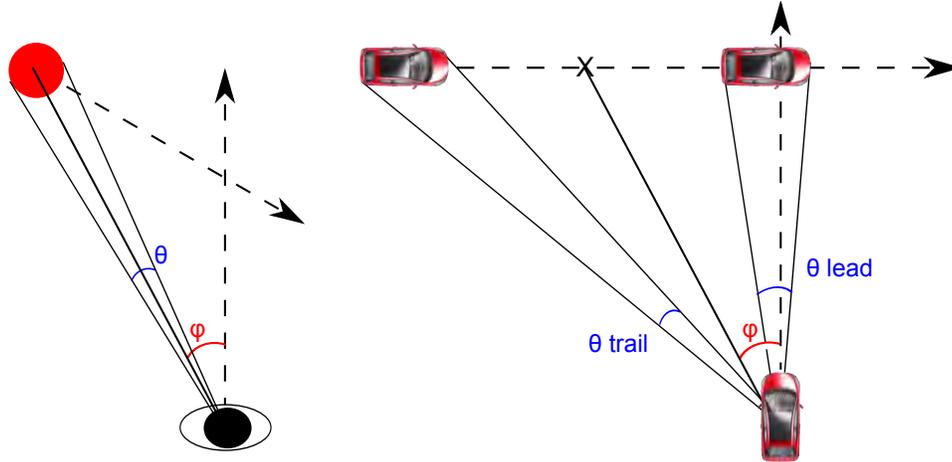


FIGURE 2.3.1 – Cette figure permet de mieux comprendre l’analogie que nous faisons entre la tâche d’interception de mobile et celle de traversée d’intersection. Dans le premier cas (illustration de gauche), un observateur (en bas) marche le long d’une trajectoire rectiligne et va intercepter une cible (balle rouge) qui croise sa trajectoire. Dans le second cas (illustration de droite), un conducteur (voiture du bas) s’approche de l’intersection et va intercepter la fenêtre inter-véhiculaire en déplacement. Dans les deux cas, l’angle de relèvement (angle séparant la trajectoire de déplacement du participant de la position de la cible) noté ϕ . Dans le cas de l’interception d’une fenêtre inter-véhiculaire nous prenons le centre géométrique de la fenêtre comme point référence.

l’angle de relèvement est l’angle qui sépare la trajectoire de déplacement du participant et la position de la cible à intercepter. Il est connu des marins qu’une valeur constante d’angle de relèvement entre deux bateaux signifie la collision future de ceux-ci. En effet, une valeur nulle de taux de changement de l’angle de relèvement (i.e., sa dérivée temporelle) spécifie de façon univoque une interception entre un agent et une cible : le taux de changement de l’angle de relèvement semble donc un invariant optique pertinent pour les tâches d’interception (i.e., c’est une information-à-propos de l’interception d’une cible que l’agent est en train de réaliser). Du point de vue du contrôle de l’action, un taux de changement positif de l’angle de relèvement impose un ralentissement de la vitesse de déplacement (l’angle entre l’agent et la cible s’ouvre, l’agent va arriver en avance par rapport à celle-ci s’il ne change pas sa vitesse), tandis qu’un taux de changement négatif impose une accélération de la vitesse de déplacement (l’angle entre l’agent et la cible se ferme, l’agent va arriver en retard par rapport à la cible). Or, les auteurs (Lenoir *et al.*, 1999) ont démontré qu’il existe une relation linéaire entre les variations de vitesse produites (i.e., les accélérations) par les participants et le taux de changement de l’angle de relèvement (i.e., sa dérivée) qui correspond à ce mode de contrôle. Ainsi, quand le taux de changement est positif, les participants décélèrent et quand le taux de changement est négatif, ils accélèrent. Ce type de comportement est donc orienté vers l’annulation des changements de l’angle de relèvement (“Constant Bearing Angle strategy”, CBA). Par ailleurs, il a été démontré que cette stratégie était utilisée par différents animaux comme le poisson (Lanchester et Mark, 1975; Rossel *et al.*, 2002), la libellule (Olberg *et al.*, 2000; Olberg, 2011) ou les chauves-souris (Ghose *et al.*, 2006) pour attraper leur proies.

La stratégie CBA semble par ailleurs être mise en œuvre de façon continue. Dans une expérience en réalité virtuelle, Chardenon *et al.* (2005) ont manipulé la vitesse horizontale de la cible en cours d’essai de façon à tester l’hypothèse d’une prise en compte continue des variations de l’angle de relèvement. La vitesse de la cible pouvait ainsi soit augmenter, soit diminuer au milieu d’un essai. Les variations

de vitesse de déplacement des participants sont cohérentes avec l'utilisation de la stratégie CBA. Les auteurs ont également manipulé l'angle d'approche de la cible qui pouvait être plus ou moins ouvert (6, 19 ou 30 degrés). L'angle d'approche de la cible affecte le taux de variation de l'angle de relèvement sans modifier les contraintes réelles de la tâche. Ainsi, plus l'angle est fermé (6° pour le maximum) et plus les variations d'angle de relèvement sont faibles et tardives, et inversement plus l'angle est ouvert (30° pour le maximum) et plus les variations de l'angle de relèvement sont élevées et précoces (voir aussi la Figure 2.3.2).

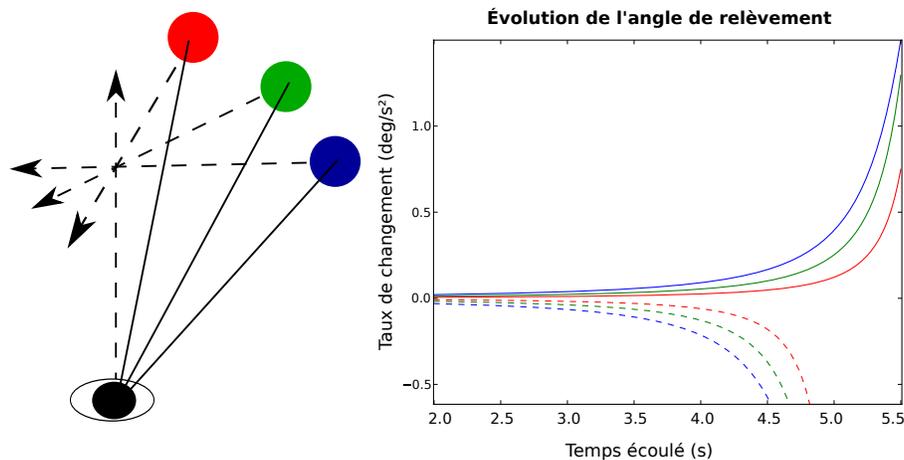


FIGURE 2.3.2 – Représentation de l'évolution du taux de changement de l'angle de relèvement (panneau de droite) en fonction de différents angles d'approche de la cible (panneau de gauche). Les courbes pleines représentent une arrivée trop précoce de l'agent vis-à-vis de la cible (son avance est constante durant toute la simulation, lui et la cible se déplacent à vitesse constante), tandis que les courbes pointillées représentent une arrivée trop tardive (son retard est constant durant toute la simulation, *idem*). Nous pouvons observer que quand l'angle d'approche est ouvert (cible bleue) les variations d'angle de relèvement sont plus fortes que quand l'angle d'approche est fermé (cibles verte et rouge) aussi bien en condition d'arrivée précoce que d'arrivée tardive.

Les régulations de vitesse produites par les participants révèlent un comportement cohérent avec cet état de fait, puisque les participants accélèrent plus précocement dans les conditions d'angle ouvert (fortes variations de l'angle de relèvement) que dans les conditions d'angle fermé (faibles variations de l'angle de relèvement). Une autre preuve forte de l'utilisation de la stratégie CBA dans les tâches d'interception consiste à analyser le comportement de régulation induit en présence de trajectoires rectilignes et curvilignes : en effet, à contraintes temporelles équivalentes, les trajectoires curvilignes induisent du point de vue de l'observateur des variations spécifiques du taux de changement de l'angle de relèvement. Bastin *et al.* (2008) et Ni et Andersen (2008) ont ainsi démontré qu'il existait une influence spécifique de la courbure indépendamment des contraintes temporelles réelles. De plus, dans ces expérimentations, l'accélération produite au cours du temps par les participants a suivi un patron de changements cohérent avec l'utilisation de la stratégie CBA. Chardenon *et al.* (2004, 2005) ont formalisé cette stratégie sous la forme d'une loi de contrôle :

$$\ddot{Y} = -k\dot{\theta} \quad (2.3.6)$$

Où $\dot{\theta}$ est le taux de changement de l'angle de relèvement et k un coefficient caractérisant la force du

couplage entre l'accélération et la variable informationnelle. Cette formulation a été ensuite enrichie par Bastin *et al.* (2006a) qui proposent la loi de contrôle suivante (voir aussi le travail de Fajen et Warren, 2003) :

$$\ddot{Y} = k_1 \frac{1}{1 + n \cdot \exp^{-mt}} \dot{\theta}(t) + k_2 \dot{Y}(t) \quad (2.3.7)$$

Où k_1 et k_2 sont des coefficients, $(1 + n \cdot \exp^{-mt})^{-1}$ est une fonction d'activation sigmoïde prenant en compte le temps et deux constantes liées aux délais perceptivo-moteurs des participants. La première formulation (Équation 2.3.6) proposait un lien linéaire entre l'accélération et le taux de changement de l'angle de relèvement. Cependant, le comportement des participants n'est pas linéaire au cours du temps. Cette nouvelle formulation autorise un meilleur ajustement aux données comportementales car elle intègre une fonction non linéaire qui dépend du temps (fonction d'activation). Ainsi, la force du couplage entre le taux de changement de l'angle de relèvement et l'accélération change au-fur-et-à-mesure de l'approche de la cible. Cette formulation intègre également un terme d'amortissement, qui prend en compte la vitesse actuelle du participant afin de prédire des accélérations plus graduelles (Wann et Wilkie, 2004). Le coefficient k_1 caractérise la force du couplage entre le taux de changement de l'angle de relèvement et le coefficient k_2 la force du paramètre d'amortissement associé à la vitesse courante de l'agent. Les simulations comportementales réalisées sur la base de la stratégie CBA (cf., Annexe C) expliquent une part élevée de la variance des données (Chardenon *et al.*, 2002; Bastin *et al.*, 2006a, 2008; Morice *et al.*, 2010; François *et al.*, 2011).

Il n'est toutefois pas certain que le taux de changement de l'angle de relèvement soit le seul invariant disponible dans ce type de tâches. En effet, la taille optique de l'objet (voir l'angle θ sur la Figure 2.3.1, illustration de gauche) à intercepter et sa vitesse d'expansion optique (qui sont indépendants de l'angle de relèvement) semblent aussi jouer un rôle dans le contrôle du comportement. De ce point de vue, certains auteurs ont montré que les jugements de temps de pré-contact lors d'une frappe de balle sont sous-estimés avec des balles de grande taille comparativement à des balles de petite taille (DeLucia, 1991; DeLucia et Warren, 1994). D'autres auteurs ont démontré que des participants devant frapper une balle initiaient leur mouvement plus précocement avec des balles de petite taille qu'avec des balles de grande taille (van der Kamp *et al.*, 1997; Michaels *et al.*, 2001). Selon, Savelsbergh *et al.* (1991), dans une tâche de capture de balle, l'action du participant était influencée par la sur-expansion (accroissement de la taille optique de la balle au cours du temps) mais pas par la sous-expansion (diminution de la taille optique). De même, dans une tâche d'interception, Bastin *et al.* (2008) ont montré qu'au-delà du fait que les participants utilisaient de façon largement prépondérante les variations de l'angle de relèvement et la stratégie CBA, une manipulation de l'expansion optique en sous-expansion ou sur-expansion provoquait un ralentissement de la vitesse d'approche dans les derniers instant de l'interception. En fait, le temps de pré-contact avec un objet en approche est spécifié par le taux d'expansion optique τ (Lee, 1976, voir aussi la Section 2.3.2 et le Chapitre 6). Il s'agit d'un invariant qui correspond à l'inverse de la vitesse relative de l'expansion des contours de l'objet en approche. Le comportement des participants pourrait prendre en compte le temps de pré-contact (Bootsma *et al.*, 1997; Jacobs et Michaels, 2006). Néanmoins les résultats mettent en évidence que la stratégie CBA explique une quantité de variance plus importante que les stratégies fondées sur le temps de pré-contact (Bastin *et al.*, 2008).

Suite à cette revue de questions, nous avons proposé une analogie entre tâche de traversée d'intersection et tâche d'interception de mobile se déplaçant horizontalement. Nous avons aussi pu constater que

le taux de changement de l'angle de relèvement est une information optique particulièrement pertinente pour la compréhension du comportement d'interception. Nous proposons ainsi d'axer notre travail sur l'étude de la plausibilité d'une telle analogie, notamment en testant l'utilisation potentielle du taux de changement de l'angle de relèvement par les conducteurs. Nous expliciterons dans la section suivante la démarche scientifique que nous allons suivre dans ce travail.

2.4 Problématique

Nous avons vu que la conduite en intersection était une activité sous forte contrainte temporelle, que les accidents qu'elle génère sont fréquents et que pour s'y adapter le conducteur met en jeu un ensemble de comportements de différentes natures (cf., Section 1.1). Ces comportements peuvent faire appel à des processus de haut niveau comme la planification et la prise de décision, mais aussi à des processus de bas niveau comme les habiletés perceptives et motrices. Comme notre question de départ est de savoir comment les conducteurs régulent leur vitesse à l'approche d'une intersection afin de s'intégrer sans collision au flux de trafic, nous nous intéresserons seulement, dans ce travail, aux comportements directement liés aux habiletés perceptives et motrices (voir la Figure 2.4.1 pour un rappel de ce niveau de comportement dans la hiérarchie de Rasmussen, 1983).

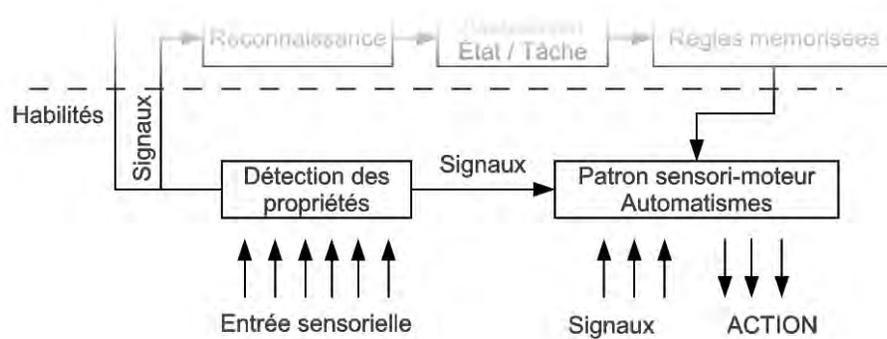


FIGURE 2.4.1 – Niveau de comportement que nous étudions dans ce travail en référence au modèle de Rasmussen (1983).

Dans ce travail, notre objectif est de répondre à notre question initiale en proposant et en testant des hypothèses fondées sur les travaux menés dans le domaine des actions visuellement guidées. A cet égard, nous avons montré qu'il n'était pas pertinent de séparer les processus perceptifs et moteurs comme cela avait pu être fait dans les précédentes recherches sur les traversées de carrefour (cf., Section 2.1). En effet, ces deux types de processus semblent s'influencer mutuellement, or la théorie de la perception directe suggère que le couplage entre perception et action permettrait un accès aux propriétés du système agent-environnement (cf., Section 2.2). L'analyse des deux processus en interaction paraît alors nécessaire.

Ainsi, cette revue de question nous a amené à nous intéresser plus particulièrement à la stratégie perceptivo-motrice que les conducteurs utilisent pour réguler leur vitesse d'approche à une intersection. Plus particulièrement, nous nous intéressons à la question de la loi de contrôle (cf., Section 2.3) utilisée pour réussir cette tâche ainsi que celle de l'information qui lui est associée (voir aussi la Figure 2.4.2).

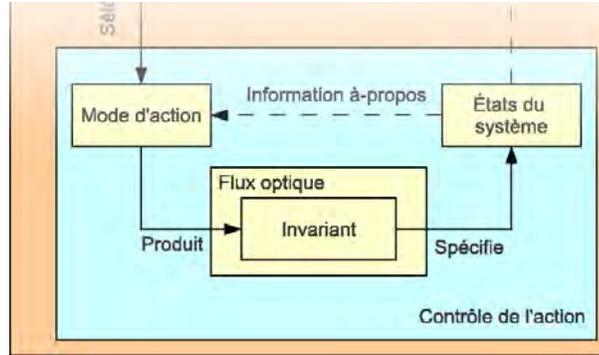


FIGURE 2.4.2 – Niveau conceptuel de la théorie de la perception directe que nous étudions dans ce travail.

Nous faisons donc l’hypothèse que la tâche de traversée d’intersection est équivalente (en terme de contrôle perceptivo-moteur) à une tâche d’interception de mobile se déplaçant horizontalement. En effet, bien que ces tâches puissent sembler différentes à première vue (les conducteurs ne cherchent pas à intercepter les véhicules du trafic), un tel cadre pourrait se révéler heuristique pour comprendre comment les conducteurs “interceptent” un créneau libre du trafic et donc une fenêtre spatio-temporelle qui se déplace horizontalement. Il s’agit donc de généraliser les résultats obtenus sur les tâches d’interception d’une cible ponctuelle (e.g., une balle) à l’interception d’une fenêtre formée par deux bornes à éviter. Les résultats obtenus dans les expériences d’interception suggèrent fortement que la stratégie de l’angle de relèvement constant pourrait être utilisée dans notre situation également (cf., Section 2.3.2). Aussi, nous pouvons décliner les objectifs de ce travail sur plusieurs niveaux :

1. Est-il pertinent d’étudier la tâche de traversée d’intersection comme une action visuellement guidée ?
2. Quelles informations seraient pertinentes pour le contrôle de l’approche d’une fenêtre inter-véhiculaire à une intersection ?
3. La stratégie de l’angle de relèvement constant peut-elle rendre compte seule du comportement des conducteurs dans cette situation ?

Pour répondre à ces questions nous allons utiliser les moyens mis à notre disposition par les simulateurs de conduite automobiles. Nous proposons un protocole expérimental qui tienne compte des contraintes associées à nos hypothèses. Il s’agira d’une tâche de traversée d’intersection sans changement de direction (cf., Section 1.1.2). Dans cette tâche, les conducteurs auront comme consigne d’ajuster leur vitesse de déplacement à l’approche d’une intersection afin de la traverser de façon sûre, à l’intérieur d’une fenêtre inter-véhiculaire composée de deux véhicules (i.e., un créneau du flux de trafic). Dans le chapitre suivant nous aborderons les concepts généraux de notre protocole expérimental (i.e., les éléments communs aux trois expérimentations que nous décrirons dans la partie expérimentale) pour expliciter le mieux possible la façon dont nous tentons de répondre à notre problématique et de mettre à l’épreuve nos hypothèses. Enfin, dans la partie expérimentale de ce travail, les trois travaux expérimentaux recouvrent globalement chacune des trois questions posées plus haut. En effet, la première expérimentation tente d’établir la nécessité d’analyser le contrôle continu du déplacement du véhicule à l’approche d’une intersection (cf., Chapitre 4), la seconde expérimentation permet de mettre en évidence

les informations pertinentes de cette situation (cf., Chapitre 5) et enfin, la dernière expérimentation met à l'épreuve l'hypothèse de l'utilisation exclusive de la stratégie CBA par les conducteurs (cf., Chapitre 6).

Chapitre 3

Méthodologie générale

3.1 Présentation du simulateur de conduite

3.1.1 Caractéristiques du dispositif expérimental

Les participants conduisent sur un simulateur à base fixe implémenté sur la plate-forme ARCHISIM (Espie et Auberlet, 2007) équipé d'un siège, d'un volant, d'une pédale d'accélération et d'une pédale de frein. L'environnement visuel (Figure 3.1.1, droite) est généré par le logiciel SIM² tandis que la gestion du trafic et l'interprétation des scénarios expérimentaux par le logiciel DR². La projection est réalisée sur trois panneaux à l'aide de projecteurs PLUS (Figure 3.1.1, gauche). Les panneaux gauche et droit sont inclinés vers l'intérieur afin de créer un champ de vision de 150° sur l'axe horizontal et 40° sur l'axe vertical. Le dispositif expérimental est animé par quatre ordinateurs : un faisant fonctionner le logiciel DR², et trois faisant fonctionner chacun un logiciel SIM² affichant la partie correspondante de l'environnement visuel. Les participants roulent sur des routes conventionnelles à deux voies de 3.5 mètres de large chacune. L'environnement visuel correspond à un environnement routier de rase campagne (environnement plat et texturé).



FIGURE 3.1.1 – Illustration du simulateur ARCHISIM utilisé dans nos trois expériences (à gauche) et du visuel type présenté aux participants (à droite). Il est demandé aux participants de traverser l'intersection entre les deux véhicules légers rouges.

3.1.2 Caractéristiques du modèle de véhicule

Le simulateur de conduite implémente une boîte de transmission automatique, les participants n'ont donc pas à s'occuper des changements de vitesse. Le véhicule du participant mesure 3.45 mètres de long et 1.55 mètres de large avec un point de vue placé à 1.15 mètres au-dessus du sol. Ce véhicule peut accélérer de 0 à 27.8 m/s (ou 100 km/h) en moins de 15 secondes avec une vitesse maximale de 44 m/s (ou 160 km/h). La dynamique d'accélération de ce véhicule (A_{max}) en fonction de la vitesse courante (v) est donnée par l'équation ci-dessous^a, qui permet également de calculer la capacité d'accélération maximale du conducteur pour chaque vitesse instantanée (Figure 3.1.2).

$$A_{max}(v) = \frac{RB_v \times CT_{max} - .5 \times Po \times AF \times Cx \times v^2 \times R - FR \times R}{MV \times R^2} \quad (3.1.1)$$

Avec (cf., Annexe B pour connaître les valeurs de configuration du véhicule) :

RB_v Le rapport de boîte pour la vitesse courante

CT_{max} Le couple de transmission maximal du moteur aux roues

Po La viscosité de l'air

AF L'aire frontale du véhicule

Cx Le coefficient aérodynamique du véhicule

R Le rayon des roues

FR La résistance au roulement

MV La masse du véhicule

3.2 Scénario expérimental

3.2.1 Composants du scénario

Dans les trois expériences qui suivent nous utilisons à chaque fois un scénario expérimental identique (voir aussi la Figure 3.2.1). Il s'agit d'une tâche de traversée d'intersection dans laquelle le participant doit rouler sans changer de direction et traverser l'intersection en passant entre deux véhicules légers arrivant par la gauche. Ces deux véhicules forment la fenêtre temporelle (ou "inter-vehicular gap" en anglais) que le participant doit utiliser pour réussir la tâche. Le premier véhicule est nommé "véhicule lièvre" (ou "lead vehicle" en anglais) tandis que le second est nommé "véhicule chasseur" (ou "trail vehicle"). Deux poids lourds "encadrent" les deux véhicules légers. Ces deux poids lourds sont présents pour rendre la tâche non ambiguë concernant l'endroit où le participant doit traverser dans le train du trafic arrivant (ou "oncoming traffic train").

Dans toutes les conditions expérimentales le centre de la fenêtre inter-véhiculaire arrive au point d'interception du carrefour 5.5 secondes après le début du scénario. Les participants débutent chaque

^aCette équation représente le couple maximal qui peut être théoriquement transmis aux roues en supposant un embrayage maximal.

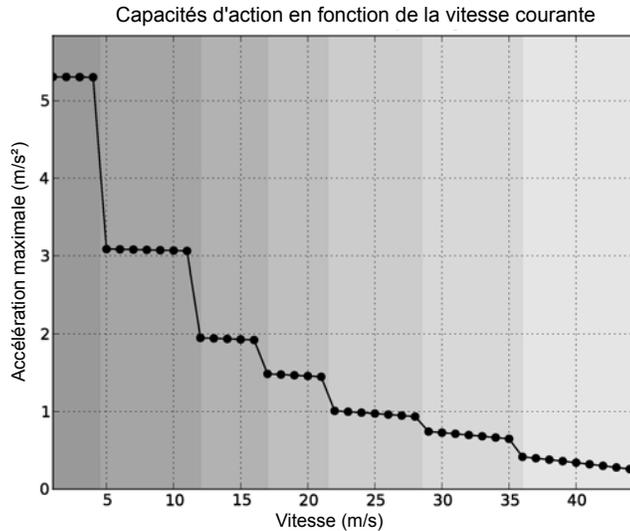


FIGURE 3.1.2 – Courbe représentant la capacité d’accélération maximale que le conducteur du véhicule simulé peut obtenir en fonction de sa vitesse instantanée. Cette courbe est obtenue par l’Équation 3.1.1.

essai à la même vitesse initiale de 16 m/s (ou 57.6 km/h). Dans la situation “contrôle” les participants sont placés à une distance de 88 mètres de ce point d’interception ce qui assure, à vitesse initiale maintenue constante, une traversée de l’intersection au centre de la fenêtre inter-véhiculaire (donc à une position équidistante des deux bornes de la fenêtre).

Néanmoins cette distance entre le point de départ du participant et le point d’intersection est manipulée dans nos trois expérimentations au travers du facteur “Offset”. Il s’agit d’un décalage spatial positif ou négatif (en mètres) par rapport à la situation “contrôle”, c’est-à-dire avec une arrivée simultanée (5.5 s) au point d’intersection à la fois du participant et du centre de la fenêtre inter-véhiculaire. L’offset imposé au participant modifie la position projetée de son futur franchissement au sein de la fenêtre inter-véhiculaire (à vitesse initiale supposée constante). Avec un offset nul, les participants devraient traverser la fenêtre inter-véhiculaire au centre de celle-ci. Avec un offset positif, le participant devrait traverser la fenêtre plus proche du véhicule lièvre (arrivée précoce), tandis qu’avec un offset négatif il devrait traverser plus proche du véhicule chasseur (arrivée tardive). Le rôle de cette variable est d’induire une nécessité pour le participant de modifier sa vitesse afin de réussir la tâche sans collision. Elle permet donc de mettre en évidence les capacités du participant à ajuster son comportement aux différentes contraintes de la tâche. En effet, les changements de vitesse apportés à chaque instant par le participant modifient son point de franchissement projeté à l’intérieur de la fenêtre (c’est-à-dire l’endroit où il franchirait la fenêtre s’il maintenait sa vitesse instantanée constante). L’évolution du point de franchissement projeté est retranscrite par la variable “déviations courantes” (cf., Section 3.3).

Dans notre paradigme expérimental, nous avons également manipulé la géométrie de l’intersection. L’intersection en croix perpendiculaire était présente dans chacune des trois expérimentations. Cependant, nous avons manipulé le facteur “Géométrie” dans la première et la troisième études, dans lesquelles l’intersection pouvait être (voir aussi la figure 3.2.1) en croix perpendiculaire, en angle ouvert (“open-angle”) ou en angle fermé (“close-angle”). Tandis que le facteur “Offset” impacte les contraintes spatiales et temporelles de la tâche, les variations du facteur “Géométrie” n’influent pas sur celles-ci. Cette variable

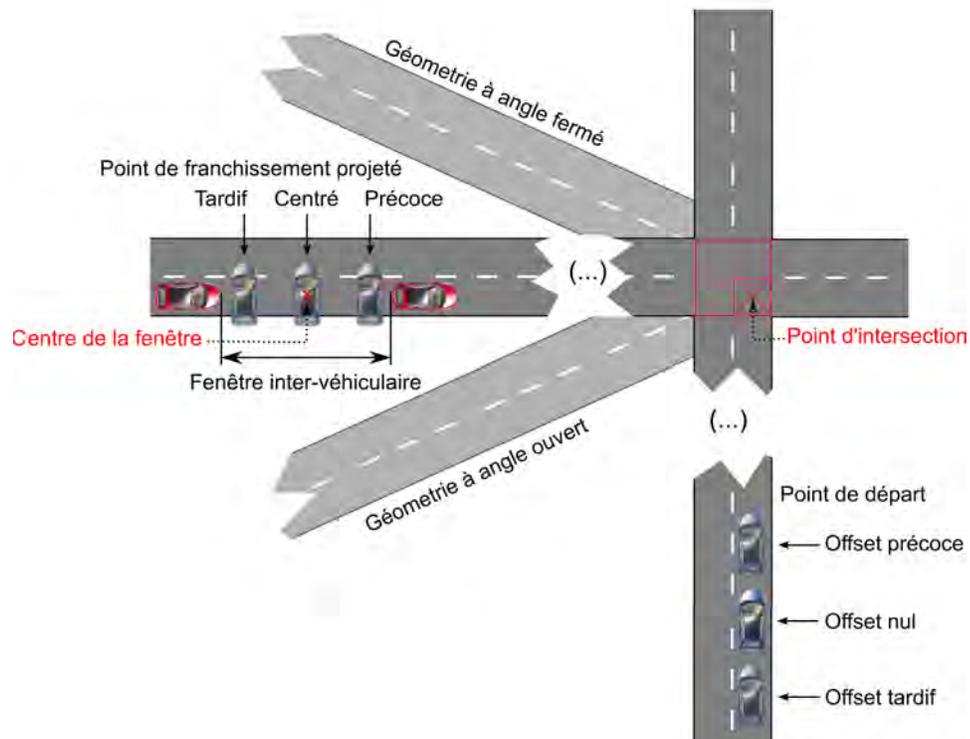


FIGURE 3.2.1 – Schéma représentant les éléments essentiels de la tâche expérimentale. Nous manipulons le point de départ des participants (facteur d'Offset) qui correspond à une position plus ou moins éloignée du point d'intersection. Dans la condition d'Offset nul et à vitesse initiale maintenue constante, le participant croise le point d'intersection en même temps que le centre de la fenêtre inter-véhiculaire. Le point de franchissement projeté représente la position où le participant va croiser la fenêtre (précoce, centrée, tardive) à vitesse maintenue constante en fonction des différents Offsets (précoce, nul, tardif respectivement). Enfin, l'angle d'approche des véhicules du trafic sont aussi manipulés expérimentalement.

correspond donc une manipulation des contraintes perceptives liées à l’environnement en manipulant la façon dont est perçue l’approche des véhicules du trafic.

3.2.2 Déroulement

Le scénario est découpé en une suite de séquences ayant chacune un rôle dans la réalisation de la tâche (voir aussi la Figure 3.2.3). Dans une première étape, le participant est à l’arrêt et doit prendre de la vitesse dans une zone d’accélération libre de 60 mètres. Une jauge horizontale (Figure 3.2.2) est affichée au centre de l’écran : une aiguille permet de visualiser la vitesse courante du véhicule (aucune indication numérique n’est donnée).

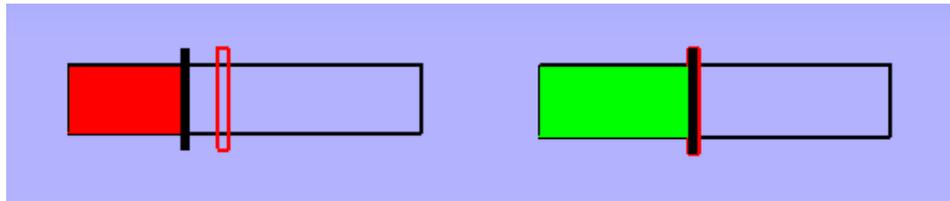


FIGURE 3.2.2 – Illustration de la jauge de contrôle de la vitesse affichée au centre de l’écran à chaque début d’essai. Sur la jauge de gauche le participant roule à une vitesse (rectangle vertical noir) inférieure à la vitesse prescrite (rectangle vertical rouge). Sur la jauge de droite, le participant a amené sa vitesse dans l’intervalle de “tolérance” de la vitesse prescrite.

Le participant doit alors amener son véhicule à une vitesse prescrite de $16 \text{ m/s} \pm 1.39 \text{ m/s}$ (ou $57.6 \text{ km/h} \pm 5 \text{ km/h}$) représentée par un cadran vertical dans la jauge. Quand le participant rentre dans ce cadran, la jauge est affichée en vert alors qu’elle est affichée en rouge quand ce n’est pas le cas. A la fin des 60 mètres d’accélération libre, le participant traverse une zone de stabilisation de 20 mètres dans laquelle sa vitesse doit nécessairement être comprise dans l’intervalle prescrit. En cas d’échec, l’essai recommence jusqu’à la réussite de ce pré-requis permettant le contrôle de la vitesse d’entrée initiale dans la tâche de traversée d’intersection. Si le participant réussit, la jauge disparaît (aucun retour sur la vitesse n’est alors fourni), le train de véhicule arrivant apparaît (d’emblée en déplacement) et le participant peut réguler sa vitesse selon son propre choix afin de traverser l’intersection à l’intérieur de la fenêtre temporelle. Aucune information ne lui est fournie sur les priorités, il lui est demandé “d’ajuster sa vitesse selon son choix afin de pouvoir passer entre les deux véhicules légers”. Il est précisé au participant que certains essais sont plus ou moins difficiles mais qu’il doit quand même toujours tenter de réaliser la tâche (même si nous lui laissons la possibilité de céder le passage dans le cas où celle-ci lui semblerait impossible à réaliser sans collision). S’il ne réussit pas la tâche (i.e., qu’il rentre en collision avec le train de véhicule ou cède le passage), un large triangle rouge est affiché pour signaler l’échec de l’essai. Dans tous les cas, une fois le participant arrivé en fin de parcours, l’essai suivant démarre. Les essais échoués ne sont pas recommencés.

3.3 Acquisition et analyse des données

L’acquisition des données se fait à une fréquence de 60Hz. Les données cinématiques recueillies sont les coordonnées dans le référentiel (x, y) de l’environnement virtuel et dans le référentiel des routes (emplacement kilométrique), ainsi que la vitesse des différents véhicules (celui piloté par les participants

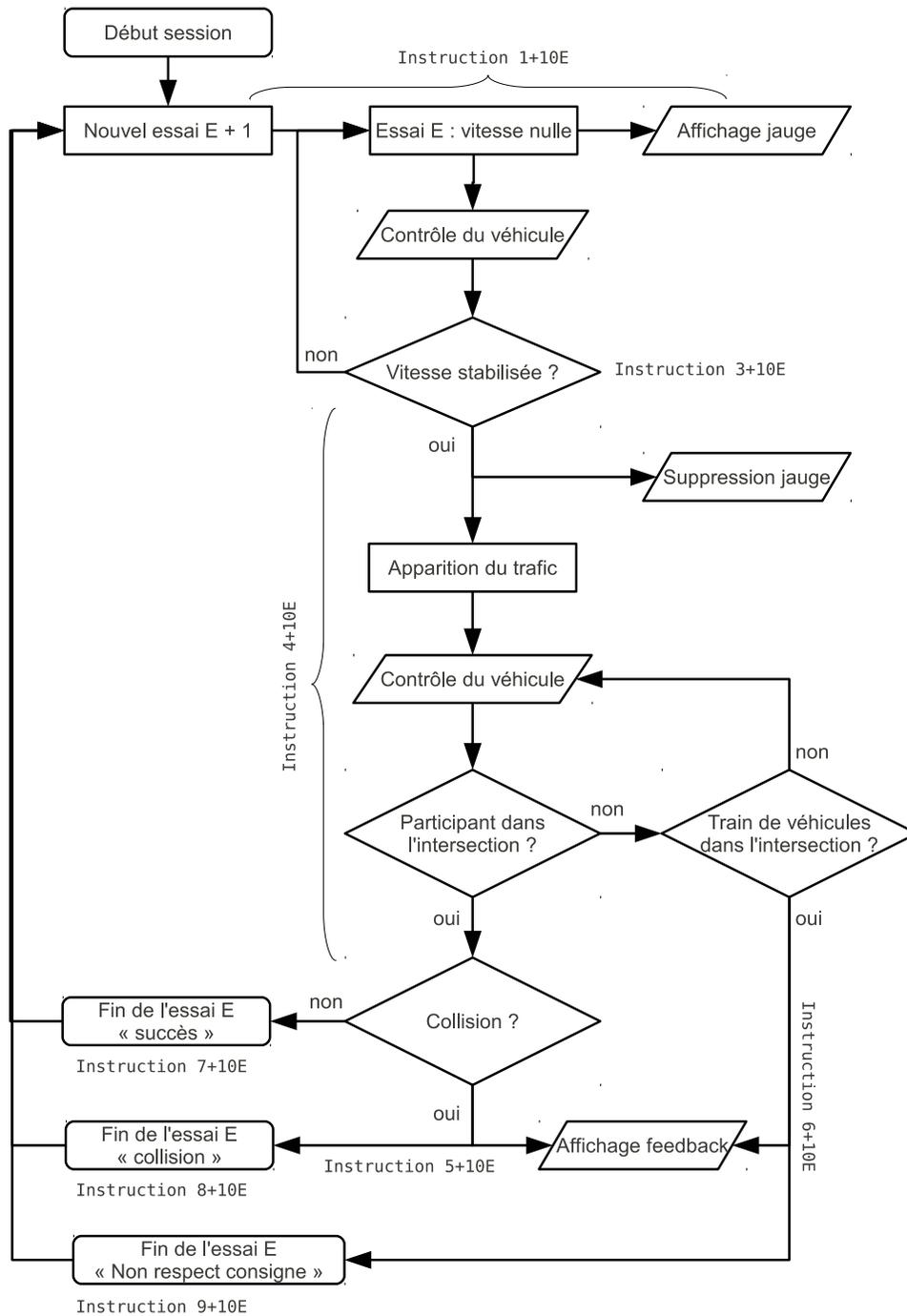


FIGURE 3.2.3 – Diagramme représentant le contrôle des événements du scénario expérimental. Une référence aux numéros d'instructions du code ARCHISIM est donnée sous la forme numéro d'instruction + numéro d'essai (E) x 10. Par exemple, l'instruction 4 de l'essai 5 sera numérotée 54 dans le code ARCHISIM du scénario.

et ceux asservis à la simulation). Aucune opération de traitement du signal n'est appliquée sur les données de vitesse car celles-ci sont calculées par le modèle de véhicule, en fonction des différents paramètres de la situation (cf., Section 3.1.2).

A partir de ces données, nous avons étudié le point de franchissement à l'intérieur de la fenêtre inter-véhiculaire à l'instant de la traversée de l'intersection. Le centre de la fenêtre est pris comme référence, une position de franchissement positive signifiant que le participant a traversé la fenêtre avant que le centre de celle-ci n'atteigne le point d'intersection (i.e., traversée proche du véhicule lièvre) et une position de franchissement négative signifiant que le participant a traversé après que le centre de la fenêtre n'ait atteint le point d'intersection (i.e., traversée proche du véhicule chasseur). Pour être analysées statistiquement, les données cinématiques sont moyennées par segments de 1 seconde jusqu'à la traversée de l'intersection (i.e.,]5;4],]4;3],]3;2],]2;1],]1;0] secondes). Les profils sont synchronisés sur l'instant de traversée (i.e., à la fin de l'essai). Les profils de vitesse sont analysés comme tels. Cependant, pour comprendre l'effet des changements de vitesse sur la future position de franchissement au moment de la traversée, nous avons utilisé un indicateur de "déviation courante" (ou "current deviation") inspiré de la mesure "d'erreur courante" (ou "current error") qui peut être trouvée dans la littérature sur l'interception de mobiles (Chardenon *et al.*, 2002). Cet indicateur correspond à la distance entre le centre de la fenêtre et la position de franchissement au sein de la fenêtre temporelle au moment de la traversée dans le cas où le participant maintiendrait sa vitesse instantanée constante sur tout le reste du parcours. La déviation courante (DC) du participant par rapport au centre de la fenêtre est calculée à chaque instant (t) comme suit :

$$DC(t)_{participant/centre} = \frac{D(t)_{centre}}{V(t)_{centre}} - \frac{D(t)_{participant}}{V(t)_{participant}} = T(t)_{centre} - T(t)_{participant}$$

Avec D la distance à l'intersection, V la vitesse instantanée et T le temps restant avant la traversée du point d'intersection. Cet indicateur est directement affecté par le facteur "Offset" au début de l'essai : avec un offset nul, maintenir sa vitesse initiale (stabilisée) amènera le participant à traverser au centre de la fenêtre (référence). Avec un offset négatif, maintenir sa vitesse initiale amènera le participant à traverser derrière le centre de la fenêtre (i.e., plus proche du chasseur). Enfin, avec un offset positif, maintenir sa vitesse initiale amènera le participant à traverser devant le centre de la fenêtre (i.e., plus proche du lièvre). L'analyse de cet indicateur en rapport avec le facteur "Offset" permet de mettre en évidence la valeur fonctionnelle (i.e., leur impact sur la réussite future de la tâche) des changements de vitesse que les participants réalisent à chaque instant. Cet indicateur met particulièrement en relief la façon dont les participants vont compenser graduellement dans le temps leur avance ou leur retard par rapport au centre de la fenêtre.

Deuxième partie

Chapitres expérimentaux

Chapitre 4

L'importance du couplage perception-action

4.1 Synthèse

Dans cette expérience, notre objectif était de démontrer l'existence de régulations continues de la vitesse de déplacement lors d'une tâche de traversée d'intersection et ainsi de mettre en évidence l'importance du contrôle continu dans cette activité de conduite. En effet, les études concernant la traversée d'intersection ont porté essentiellement sur les processus perceptivo-cognitifs qu'elle implique (Caird et Hancock, 2002). Un premier groupe d'études a exploré les capacités d'anticipation du temps de passage du conducteur comparativement à celui d'un véhicule obstacle s'approchant de l'intersection. Dans ce type d'études, les participants sont placés en mouvement passif en direction de l'intersection. Un véhicule obstacle arrive par la gauche ou la droite, puis la scène disparaît quelques fractions de secondes avant l'arrivée à l'intersection. Les participants doivent alors soit estimer le temps restant avant le passage du véhicule en face de lui (Caird et Hancock, 1994), soit estimer s'ils auraient traversé l'intersection avant ou après le véhicule obstacle (Berthelon et Mestre, 1993; Berthelon *et al.*, 1998). Un autre groupe d'étude s'est intéressé à la prise de décision de réalisation d'une manœuvre dans l'intersection. Dans cette situation, les participants sont à l'arrêt à une intersection et voient s'approcher un ou plusieurs véhicules. Ils doivent alors dire s'ils auraient réalisé la manœuvre de traversée dans ces conditions-là (Hancock *et al.*, 1991; Dewing *et al.*, 1993) ou la réaliser effectivement quand ils pensent que cela est possible (Gray, 2004).

Cependant, certaines études semblent démontrer que la perception est couplée au mouvement de l'acteur dans son environnement (Oudejans *et al.*, 1996a). Pour mieux comprendre le comportement du conducteur dans une tâche de traversée d'intersection, il serait donc intéressant d'éclairer les processus perceptifs et moteurs mis en jeu. Dans ce cadre, nous avons créé un scénario expérimental sur simulateur de conduite (cf., Partie 3.2 pour plus de détails) dans lequel les participants doivent traverser une intersection en passant à l'intérieur d'une fenêtre inter-véhiculaire. Cette fenêtre correspond à un créneau libre du trafic défini par l'espace entre deux véhicules légers approchant l'intersection. Nous faisons l'hypothèse que ce type de tâche peut être rapprochée d'une tâche d'interception de mobile se déplaçant horizontalement. En effet, les participants doivent dans notre scénario "intercepter" un intervalle libre

qui va croiser leur trajectoire de déplacement. Les ajustements comportementaux impliqués dans de telles tâches d’interception sont connus pour être produits de façon continue tout au long de l’activité (Bastin *et al.*, 2006b; Chardenon *et al.*, 2002; Fajen et Warren, 2007; Ni et Andersen, 2008).

Pour mettre en évidence les ajustements comportementaux des conducteurs au cours du temps nous avons manipulé expérimentalement les contraintes de la tâche d’une part (Offset et Taille de la fenêtre) et les contraintes perceptives imposées par l’environnement d’autre part (Géométrie de l’intersection). Le facteur Offset correspond à une manipulation du point de départ de l’essai aboutissant à différents lieux de franchissement, pour une vitesse initiale (16 m/s) maintenue constante durant l’essai (5.5 s) : un offset de -6.25 mètres correspond à une arrivée tardive 6.25 mètres derrière le centre de la fenêtre ; un offset de 0 mètre correspond à une arrivée au centre de la fenêtre et un offset de +6.25 mètres correspond à une arrivée en avance 6.25 mètres devant le centre de la fenêtre. La Taille de la fenêtre peut être petite (18.75 mètres) ou grande (23.25 mètres). Enfin, la Géométrie de l’intersection peut correspondre à un angle perpendiculaire, ouvert ou fermé (voir la section 3.2.1 pour plus de détails). Nous étudions la position de traversée à l’intérieure de la fenêtre inter-véhiculaire et les profils de vitesse et de déviation courante.

Les résultats révèlent que les participants s’adaptent à la fois aux contraintes de la tâche (Offset et Taille de la fenêtre) et aux contraintes perceptives associées à l’environnement (Géométrie de l’infrastructure). Les résultats montrent globalement que les participants compensent graduellement durant toute la tâche le décalage qui leur est imposé par le facteur Offset et convergent vers le franchissement de la fenêtre dans une zone réduite, proche du centre de celle-ci et du côté du véhicule lièvre (premier véhicule obstacle à franchir l’intersection). Les participants traversent également d’autant plus près du véhicule lièvre que la fenêtre est grande. Les résultats semblent indiquer la mise en œuvre d’une stratégie orientée vers la maximisation de la marge de sécurité^a vis-à-vis du véhicule fermant la fenêtre. Enfin, dans une configuration de géométrie en angle fermé, les participants roulent significativement plus doucement et traversent plus loin du véhicule lièvre (i.e., prennent une plus petite marge de sécurité vis-à-vis de la fermeture de la fenêtre) que dans une configuration en angle perpendiculaire. Symétriquement, dans la configuration en angle ouvert, les participants roulent significativement plus rapidement et traversent plus près du véhicule lièvre (i.e., prennent une plus grande marge de sécurité vis-à-vis de la fermeture de la fenêtre) que dans une configuration en angle perpendiculaire.

Cette étude souligne bien l’importance du couplage perception-action dans la conduite en intersection. En effet, le patron comportemental mis au jour révèle une régulation continue de l’approche (par opposition à une régulation fondée sur une prédiction précoce). De plus, ces résultats mettent en évidence la similarité comportementale entre notre tâche de traversée d’intersection et celle d’interception de mobile. En effet, les ajustements observés dans la vitesse de déplacement sont proches de ceux obtenus dans les tâches d’interception notamment au regard du facteur Offset (Bastin *et al.*, 2006b) mais aussi du facteur Géométrie (Chardenon *et al.*, 2005). Dans ces dernières études, l’utilisation d’une stratégie fondée sur le maintien de l’angle de relèvement (angle entre la trajectoire du participant et la position de la cible) à une valeur constante (ou Constant Bearing Angle strategy) a été démontrée comme pertinente pour expliquer les données expérimentales. Il a également été démontré que lors de l’approche d’une cible selon une trajectoire en angle fermé les variations d’angle de relèvement sont plus réduites

^aPar marge de sécurité nous entendons ici la distance entre le véhicule chasseur et le point de franchissement de la fenêtre par les participants. En effet, comme la fenêtre inter-véhiculaire est “fermée” par le passage du véhicule chasseur dans l’intersection, le risque de collision à l’approche de l’intersection est plus probable avec celui-ci qu’avec le véhicule lièvre.

que lors de l'approche d'une cible selon une trajectoire en angle ouvert : les participants produiraient ainsi des régulations de leur vitesse moins précoces dans la première situation que dans la dernière.

Néanmoins, d'autres variables optiques comme la taille de l'objet en approche (taille de la fenêtre ou celle des véhicules) varient différemment au cours du temps selon la géométrie de l'intersection. Elles pourraient donc aussi jouer un rôle dans la production d'un comportement différencié selon les conditions d'angle d'approche. Ainsi, cette première expérience ne permet pas d'affirmer la pertinence du taux de changement de l'angle de relèvement comme paramètre régulateur de la vitesse d'approche en intersection. Il n'est pas possible non plus d'affirmer que les participants mettent en œuvre une stratégie d'interception car la tâche peut aussi impliquer une stratégie d'évitement de collision. La question de la stratégie mise en œuvre par les participants nous amène directement à celle de la contribution spécifique de chaque élément physique de la fenêtre inter-véhiculaire. En effet, la mise en œuvre d'une stratégie d'interception de l'espace libre de la fenêtre inter-véhiculaire suppose l'utilisation de variable(s) optique(s) liée(s) à la fenêtre temporelle elle-même tandis que la mise en œuvre d'une stratégie d'évitement de collision suppose l'utilisation de variable(s) optique(s) liée(s) aux bornes de la fenêtre (i.e., les véhicules du trafic qui la délimitent).

Pour cette raison, nous chercherons dans la prochaine expérimentation à déterminer quels éléments de la fenêtre inter-véhiculaire ont une fonction de régulatrice sur la vitesse d'approche de l'intersection. Plus précisément, nous testerons le rôle des contributions perceptives globales de la fenêtre (cinématique du centre de la fenêtre et évolution de la taille de celle-ci) ainsi que celui des contributions perceptives locales de la fenêtre (cinématique indépendante des deux véhicules du trafic qui la forment). L'impact des contributions globales de la fenêtre sur la vitesse d'approche des participants pourrait plaider en faveur de la mise en œuvre d'une stratégie d'interception tandis que l'impact des contributions locales de celle-ci plaiderait plutôt en faveur de la mise en œuvre d'une stratégie d'évitement de collision.

4.2 Manuscrit de l'étude

Introduction

Intersection crossing is one of the most demanding maneuvers a driver has to perform on a regular basis. In the context of a dynamic environment, continuously changing with the flow of incoming traffic, the driver must not only take an appropriate decision (to cross or not to cross), but must subsequently also control the action selected. Perhaps not surprisingly, 45% of the 2.7 million US traffic accidents reported in 2003 occurred at intersections (Richard, 2006). Intersection accidents represented 12% of traffic fatalities and 27% of all injuries in France in 2007 (ONISR, 2007). According to Page et Chauvel (2004), intersection fatalities are due essentially to either left-turn (33%) or rectilinear-crossing maneuvers (31%).

A large body of research has been devoted to understanding the perceptual mechanisms implicated in crossing different kinds of intersection (see Caird et Hancock, 2002 for a review). The grand majority of these studies have focused on the factors underlying the perception of time to arrival of incoming vehicles and the decision to accept a traffic gap for crossing.

In the first kind of studies, participants are confronted with motion prediction or extrapolation tasks. Following a truncated viewing period, stationary or passively displaced observers are asked to indicate when an incoming vehicle would have reached the intersection location. Judgments have been shown to be influenced by a number of factors, such as the size and the speed of the traffic vehicles (Caird et

Hancock, 1994) and their path curvature (Berthelon et Mestre, 1993), but also the cognitive style of the participants (Berthelon et al., 1998) or their age (Barbet et al., 2006).

In the second kind of studies, the factors influencing the decision to cross an intersection have been addressed. Here, participants are asked to indicate when they would initiate a maneuver, such as left-turn crossing. Various characteristics of the incoming traffic have been examined, including the type of vehicle (motorbike, car, truck), the displacement speed and the inter-vehicular temporal interval (e.g., Hancock et al., 1991; Dewing et al., 1993). Dewing et al. (1993), for example, demonstrated that the probability of initiating a left-turn maneuver increased when both the speed of the incoming vehicles and the inter-vehicular distance increased, and decreased when the size of the incoming vehicle increased.

Overall these studies have clearly contributed to the understanding of intersection crossing behavior. Yet they suffer from an artificial separation between perception and action: Judging when a vehicle will arrive at an intersection or judging when to initiate a crossing maneuver is unlikely to capture the full richness of the reciprocal relations between perception and action that characterize unfolding behavior. As already acknowledged by Caird et Hancock (1994), the above-cited kinds of study might thus be characterized as soliciting “a single action in response to a limited event” (p. 103).

Functional links between perception and action have indeed been described on several occasions in the literature on the control of goal-directed behavior. Not only are these links crucial during the unfolding of actions such as intercepting moving objects or avoiding obstacles (e.g., McLeod et Dienes, 1993; Montagne et al., 2003), but they also allow participants to improve their capacity to choose the appropriate action in a number of tasks (e.g., Oudejans et al., 1996a; Cornus et al., 1999). As an example, Oudejans et al. (1996a) showed that moving pedestrians were more likely to choose the appropriate action (i.e., to cross or not to cross) as a function of temporal constraints, in comparison with stationary pedestrians. This result reveals that information about on-going action can lead to a better discrimination of action boundaries. A recent experiment by Gray (Gray, 2004; but also see Bootsma, 1989) provided results in support of this idea. Participants actively engaged in a turn-left task were shown to take safer decisions than participants who were asked to indicate when they would have initiated the maneuver by pushing a button. Such results reinforce the need for maintaining the natural link between perception and action when studying the mechanisms underlying the control of goal-directed action.

The present study focuses on the control of the action during interception crossing. To our knowledge to date this question remains largely unexplored. Even though some perceptual-motor strategies have been tentatively suggested (Caird et Hancock, 1994; Gray, 2004) and differences between children and adults have been demonstrated in bicycle crossing task (Chihak et al., 2010), there is a still paucity of studies that experimentally explore this issue. If one considers the driver’s task as one of intercepting a moving traffic gap, a theoretically and practically useful analogy between intersection crossing and interception may be established. The perceptual-motor mechanisms underlying interceptive actions of sufficiently long durations to allow online control are indeed well documented. It is, for instance, clearly established that the final accuracy at the moment of interception results from gradual, information-based adjustments produced during the approach phase (Bastin et al., 2006a; Chardenon et al., 2002; Fajen et Warren, 2007; Ni et Andersen, 2008). Particular laws of control, formally expressing the operative reciprocal links between perception and action, have been demonstrated to adequately capture and predict the characteristics of the regulation behavior observed in interceptive tasks. The effects of, for instance, the curvature of the to-be-intercepted object’s trajectory (e.g., Bastin et al., 2008) or its angle



Figure 4.2.1: Illustration of the experimental setting (left panel) and the task's visual rendering as seen by participants (right panel). The task was to cross the intersection using the gap between the two cars.

of approach (Chardenon *et al.*, 2005) have been shown to lead to displacement regulations predicted both qualitatively and quantitatively by these laws of control. Such results again reinforce the need for preserving the natural relations between perception and action when studying the control of goal-directed behavior in general and intersection crossing tasks in particular.

In the present study participants actively drove a vehicle towards an intersection with incoming traffic. Their task was to cross the intersection using a gap in the traffic train. The use of a driving simulator allowed controlled manipulation of constraints at the level of the task and the environment. Spatiotemporal task requirements were manipulated by varying the size of the available traffic gap and its moment of arrival at the intersection. Environmental constraints were manipulated by varying the geometry of the intersection, thereby affecting the traffic train's angle of approach. If, as hypothesized, the control of intersection crossing would rely on a close coupling between perception and action, such manipulations of task and environment constraints should give rise to displacement adjustments, with regulations distributed throughout the approach. Particularly, and as already demonstrated in the case of interceptive tasks, manipulating the angle of approach should give rise to specific displacement adjustments that are not related to the task's spatiotemporal requirements but to the optical support for the visual control of action.

Material and methods

Participants

Thirteen participants (28.0 ± 4.2 years old), with normal or corrected to normal vision, volunteered for participation in the experiment. They all held a driver's license for an average duration of 8.9 ± 3.3 years.

Apparatus and visual environment

Participants drove a fixed-base SIM² driving simulator (see Figure 4.2.1, left panel) equipped with a car seat, a steering wheel, and a pair of accelerator and brake pedals. The drivers' visual environment was generated using the ARCHISIM (early 2009 release) software package (Espie et Saad, 2000; Espie et Auberlet, 2007). Using three PLUS projectors operating at 60 Hz, the visual scene was presented on three flat screens with the left and right screens oriented inward so as to sustain a total horizontal visual angle of 150° for a vertical visual angle of 40°. Participants drove on a conventional two-lane 7-m wide textured road through a flat rural environment (see Figure 4.2.1, right panel). The driving simulator implemented an automatic transmission so that participants did not have to shift gears. The participant's car was 3.45 m long and 1.55 m wide, with the viewpoint located 1.15 m from the ground.

Task and procedure

In order to familiarize the participants with the simulator, they first performed a following task, consisting of attempting to remain at a constant distance (of two central line segments) behind a car moving in front. The latter changed speed regularly, moving at 50, 60 or 70 km/h during 4, 6, or 8 second periods. Speeds levels and durations were randomly combined into a sequence of eight min. Accelerating, decelerating, and maintaining velocity during this following task allowed the participant to discover the action capabilities of the simulated vehicle driven. Following this familiarization phase and a short break, the experimental phase was started.

During the experimental phase, the participants' task was to safely cross an intersection formed by two straight roads. During approach to the intersection, the participant was confronted with a four-vehicle traffic train coming from the left and moving at a constant speed of 10 m/s (36 km/h). This traffic train consisted of a truck, two cars and another truck (see Figure 4.2.1, right panel). Participants were to cross the intersection using the gap between the two cars. In the absence of any horizontal or vertical traffic signs, no information with respect to priority was provided. The four-vehicle traffic train always moved in such a way that the centre of the traffic gap (between the two cars as measured by the distance between the lead vehicle's rear bumper and the trail vehicle's front bumper) arrived at the middle of driver's lane 5.5 s after the beginning of the intersection scenario.

Three aspects of the situation were experimentally manipulated: the size of the traffic gap, the geometry of the intersection and the initial position of the driver. The spatial window available for passing the intersection was either 18.5 or 23.5 m, corresponding to a temporal window of 1.85 or 2.23 s. Varying the intersection angle between the two roads (60°, 90°, or 120°) affected intersection geometry. From the participant's point of view (Figure 4.2.2), the three different intersection geometries gave rise to open-angle, perpendicular angle, or closed-angle intersections.

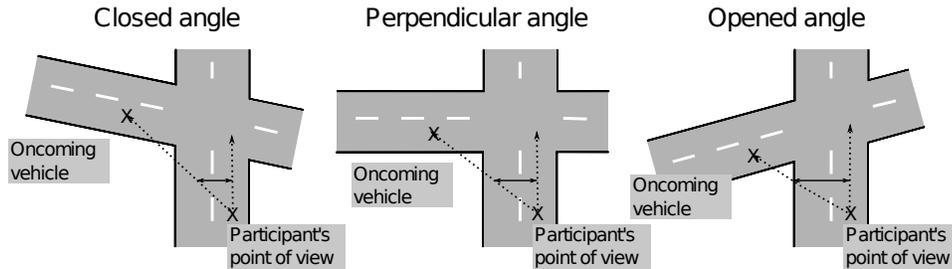


Figure 4.2.2: The three different intersection geometries used give rise to three different angle-of-approach conditions. The traffic vehicles move from the left to right and participants from bottom to top. The arrows indicate the angular distance between the participant's trajectory and an oncoming object. For equivalent distances to the intersection this angle is large in the opened angle condition, small in the closed angle condition and intermediate in the perpendicular angle condition.

The final factor manipulated was the participant's initial distance from the intersection so as to create an offset between the anticipated arrival and the centre of the traffic gap. To this end, the distance remaining to the intersection was set to 78, 88, or 98 m at the moment the participant had stabilized the car's velocity (see below). If the participant would continue at the stabilized velocity (16 m/s = 57.6 km/h), s/he would arrive at the intersection with a spatial offset of -6.25 (Late lag), 0 (No lag), or +6.25 m (Early Lag) with respect to the centre of the traffic gap (corresponding respectively to a temporal offset of -0.625, 0, or +0.625 s). Note that the ± 6.25 m (± 0.625 s) offsets still allowed

to safely pass the intersection, as the minimal available window was 18.5 m (1.85 s) allowing 9.25 m (0.9235 s) on either side of the centre (Figure 4.2.3).

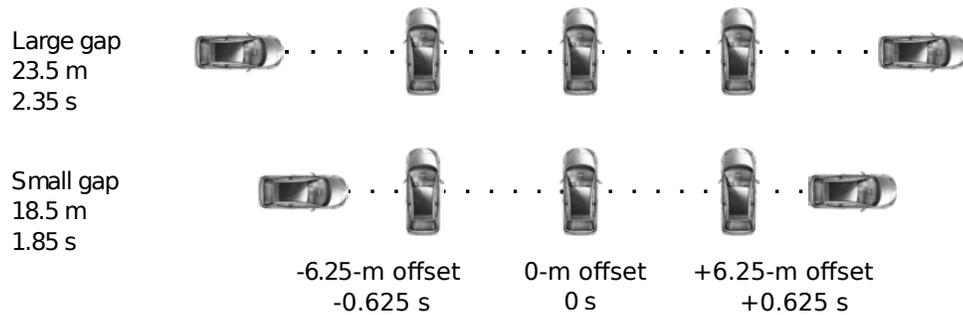


Figure 4.2.3: Drivers' future position within the traffic gap if they continue at the initial velocity for gap sizes of 23.5 m (top) and 18.5 m (bottom) and for offsets of -6.25 m (left), 0 m (middle), and +6.25 m (right).

At the beginning of each trial, participants found themselves parked (i.e., with zero velocity) in the middle of their lane, without any other vehicles in sight. They started the car's engine and operated the accelerator pedal in order to attain a required velocity indicated by a speed dial placed directly in front of them. Their current speed was indicated by the needle's orientation and the required speed by a red zone on the dial, without any numerical information being provided. Speed had to be stabilized within the indicated zone. An 80-m long stretch of empty road was available for the initial acceleration and subsequent stabilization of speed. If the participant's car speed remained within the delimited zone (corresponding to 16.0 ± 0.69 m/s = 57.6 ± 2.5 km/h) over the last 20 m of the 80-m stretch, the speed dial disappeared and the intersection scenario was started, with the four-vehicle traffic train appearing on the left. If not, the trial was restarted. In the (rare) case that the driver did not pass between the traffic vehicles (colliding with one of them or braking so as to let the full four-vehicle traffic train pass) a large red triangle was presented.

Combining two gap sizes, three intersection geometries, and three driver position offsets, an experimental block consisted of $2 \times 3 \times 3 = 18$ trials. Each participant performed five blocks of 18 trials for a total of 90 trials. The order of presentation of the 18 different conditions was randomized within each block.

Data analysis

Intersection crossing was analyzed via the position of the participant within the traffic gap at the moment of crossing. Taking the centre of the gap as the reference, a negative position indicates crossing after the centre of the gap (i.e., closer to the trail vehicle) while a positive position indicates crossing before the centre of the gap (i.e., closer to the lead vehicle).

In order to examine the nature of the velocity adjustments effected during approach to the intersection, we analyzed the time course of participant's velocity and its instantaneous effect on future passing position within the traffic gap. The latter was operationalized through the current deviation from the traffic gap centre, calculated as the distance from the centre of the traffic gap at which the participant would pass the intersection if the current velocity were to remain constant. With an offset of 0 m, continuing at the initial (stabilized) velocity would lead the participant to pass right in the centre of the traffic gap. Thus, at the start of a 0-m offset trial, the current deviation is equal to 0 m. With an

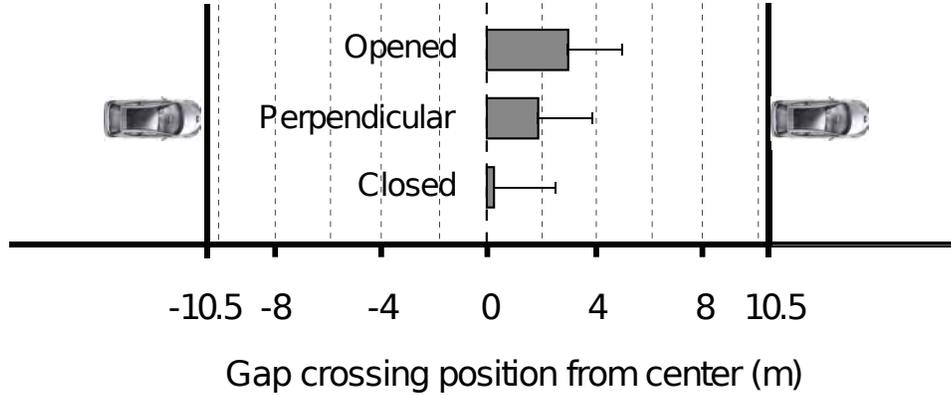


Figure 4.2.4: Crossing position within the traffic gap as a function of intersection geometry. The gap's centre is represented by zero.

offset of -6.25 m, continuing at the initial velocity would lead the participant to pass 6.25 m behind the centre of the traffic gap. Thus, at the start of a -6.25-m offset trial the current deviation is -6.25 m. With an offset of +6.25 m, continuing at the initial velocity would lead the participant to pass 6.25 m in front of the centre of the traffic gap. Thus, at the start of a +6.25-m offset trial the current deviation is +6.25 m. Analyzing the time course of the current deviation allows a functional interpretation of the observed velocity adjustments. The time course of velocity and current deviation was analyzed in five time steps, by averaging the velocity and current deviation over five 1-s intervals synchronized with the final moment of passing the intersection (i.e., 5 to 4 s, 4 to 3 s, 3 to 2 s, 2 to 1 s, 1 to 0 s before the participant arrived at the intersection).

Results

Success rate and gap crossing location

Notwithstanding the task constraints, participants were highly successful in using the available traffic gap to cross the intersection : only 4 out of a total of 1170 trials gave rise to a collision for a global success rate of 99.7%. The position in the traffic gap at which participants crossed the intersection was on average slightly biased towards the lead vehicle, for a grand mean of 1.68 m (SD = 2.45 m). A repeated-measures ANOVA revealed significant main effects of the factors Offset ($F(2, 24) = 96.1, p < .001, \eta^2 = .89$), Gap Size ($F(1, 12) = 360, p < .001, \eta^2 = .97$) and Geometry ($F(2, 24) = 105.6, p < .001, \eta^2 = .90$). The interaction between Offset and Gap Size was also significant, $F(2, 24) = 8, p < .01, \eta^2 = .40$.

The effect of the geometry of the intersection (not interacting with any of the other variables) is presented in Figure 4.2.4. As demonstrated by a Scheffé post-hoc test performed on the main effect, participants crossed the intersection 0.95 m closer to the lead vehicle in the open-angle geometry than in the perpendicular geometry ($p < .01$). In the latter condition the passing position was 1.7 m closer to the lead vehicle than in the closed-angle geometry ($p < .01$).

Post-hoc analysis of the interacting effects of Offset and Gap Size (see Figure 4.2.5) demonstrated that for both gap sizes passing position was larger for the +6.25 m offset than for the 0-m offset ($ps < .01$) and was smaller for the -6.25 m offset than for the 0-m offset ($ps < .01$). For each offset, passing distance was larger for the larger gap size than for the smaller gap size ($ps < .01$). The interaction

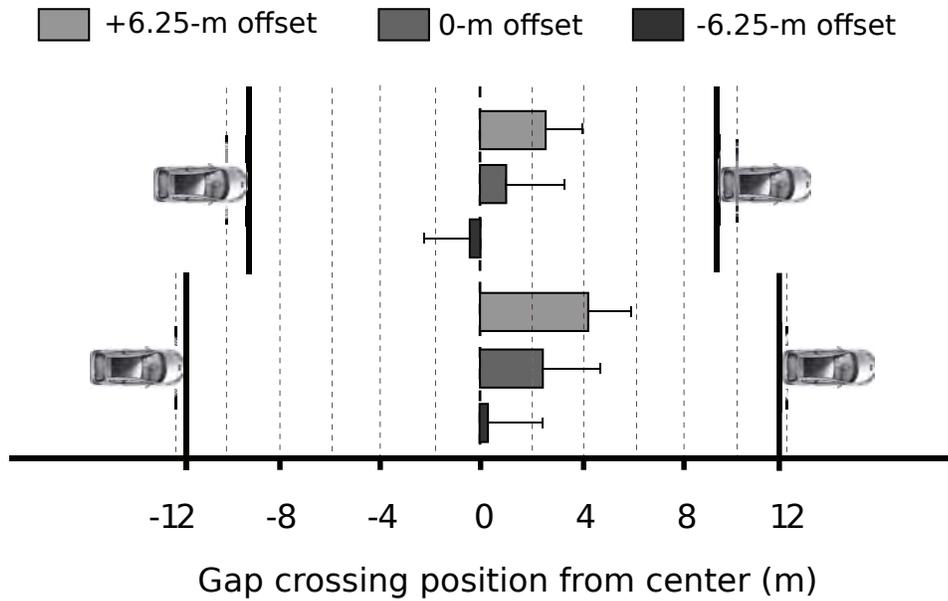


Figure 4.2.5: Crossing position within the traffic gap as a function of offset for the small (top) and large (bottom) gap sizes.

resulted from the fact that the effect of offset was amplified for the larger gap size as compared to the smaller gap size.

Velocity profiles

If participants were aiming for a position close to the centre of the traffic gap, one would expect that they maintain their initial velocity in the 0-m offset conditions, accelerate in the -0.625-m offset conditions, and decelerate in the +6.25-m offset conditions. Qualitatively, the pattern of results obtained corresponded to these expectations. In the 0-m offset conditions, participants maintained their velocity for the first few seconds while systematically accelerating in the last few seconds before reaching the intersection. This resulted in the observed positive bias in the passing position within the traffic gap. In the -6.25-m offset conditions, participants began accelerating early on during approach, continuing to do so as they approached the intersection. In the +6.25-m offset conditions, participant began decelerating early on during approach and then re-accelerated in the vicinity of the intersection. Let us examine this global pattern of results in more detail as a function of the experimental factors.

A repeated-measures ANOVA of the velocity profiles, with factors Offset, Gap Size, Geometry, and Time revealed significant main effects of all four factors : Offset ($F(2, 24) = 597.9, p < .001, \eta^2 = .98$), Gap Size ($F(1, 12) = 403.5, p < .001, \eta^2 = .97$), Geometry ($F(2, 24) = 79.5, p < .001, \eta^2 = .87$), and Time ($F(4, 48) = 74.6, p < .001, \eta^2 = .86$). Significant first-order interactions appeared for Offset x Gap Size ($F(2, 24) = 5.7, p < .01, \eta^2 = .32$), Offset x Time ($F(8, 96) = 496.9, p < .001, \eta^2 = .98$), Gap Size x Time ($F(4, 48) = 85.2, p < .001, \eta^2 = .88$), and Geometry x Time ($F(8, 96) = 35.5, p < .001, \eta^2 = .75$). Finally, significant second-order interactions appeared for Offset x Gap Size, Time ($F(8, 96) = 3.6, p < .001, \eta^2 = .23$), Offset x Geometry x Time ($F(16, 192) = 3.8, p < .001, \eta^2 = .24$), and Gap Size x Geometry x Time ($F(8, 96) = 2.3, p < .05, \eta^2 = .16$). As the interesting effects are captured by the overarching second-order interactions, we analyzed these using Scheffé post-hoc tests.

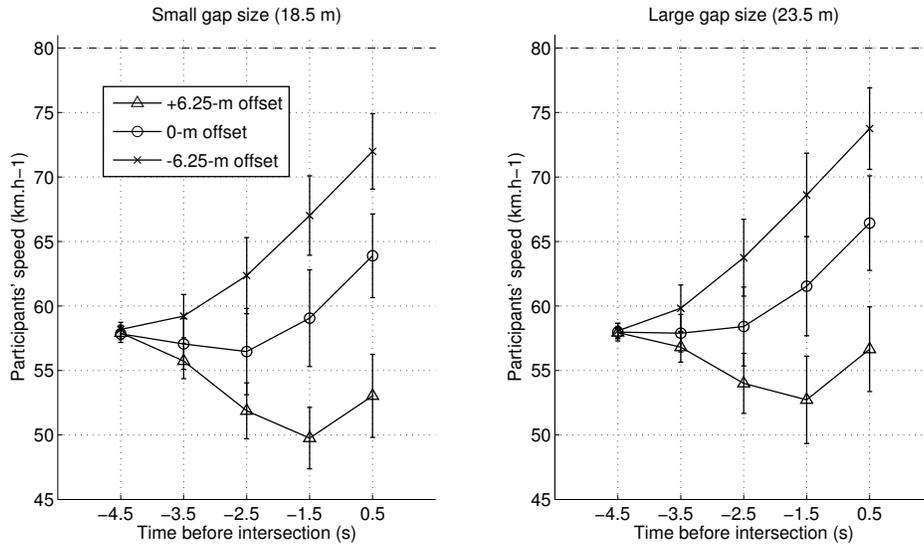


Figure 4.2.6: Participants' speed in the three offset conditions as a function of time for the small (left) and large (right) gap sizes. Dashed lines represent maximal speed attainable in 5.5 seconds.

The analysis of the Offset x Gap Size x Time interaction (see Figure 4.2.6) indicated that the participants regulatory behavior induced by the offsets occurred early on during approach for both gap sizes : Over the first two seconds of the unfolding scenario they already accelerated in the -6.25 m offset conditions and decelerated in the +6.25-m offset conditions, as indicated by significant changes in velocity between -4.5 and -3.5 s ($ps < .001$). No significant changes in velocity were observed over the first three seconds in the 0-m offset conditions. A significant acceleration over the last second (between -1.5 and -0.5 s) was observed for all conditions ($ps < .001$). In line with the effect of Gap Size on the final position within the traffic gap, the final accelerations were larger for the larger gap size.

The analysis of the Offset x Geometry x Time interaction (Figure 4.2.7) indicated that in 0-m offset and +6.25-m offset conditions, Geometry influenced the participant's speed during the last three seconds of the approach. During this time, participants' velocity was significantly ($ps < .05$) higher in the open-angle geometry and significantly ($ps < .05$) lower in the closed-angle geometry than in the perpendicular-angle geometry.

Finally, the Gap Size x Geometry x Time interaction indicated that the above described effects of intersection geometry on the last three seconds of approach were amplified in the larger gap sizes conditions as compared to the smaller gap size conditions.

Current deviation profiles

Continuously extrapolating the current state of affairs to the future moment of passing the intersection, the variations over time of the current deviation from the centre of the traffic gap allow a functional interpretation of the observed velocity adjustments. Although the offsets used were small enough to allow participants to pass the intersection without changing velocity, the global pattern of results obtained indicated nevertheless that they sought to pass near the middle section of the traffic gap : The velocity adjustments observed in both the positive and negative offset conditions gave rise to a decrease in current deviation over the course of the approach. Let us examine this global pattern of results in more detail

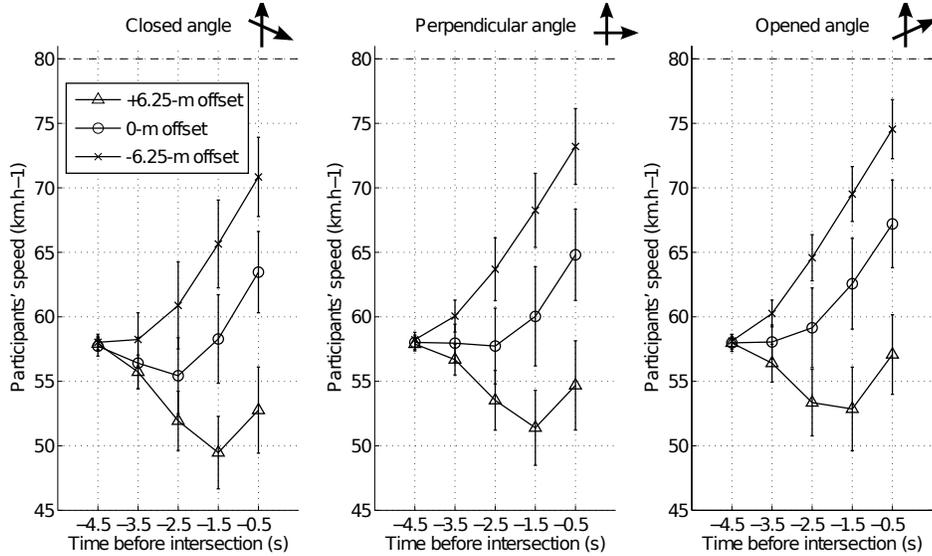


Figure 4.2.7: Participants' speed in the three offset conditions as a function of time for the closed-angle (left), perpendicular angle (middle) and opened-angle (right) intersection geometries. Dashed lines represent maximal speed attainable in 5.5 seconds.

as a function of the experimental factors.

A repeated-measures ANOVA of the current deviation profiles, with factors Offset, Gap Size, Geometry, and Time revealed significant main effects of all four factors : Offset ($F(2, 24) = 659.1, p < .001, \eta^2 = .98$), Gap Size ($F(1, 12) = 221.0, p < .001, \eta^2 = .95$), Geometry ($F(2, 24) = 58.0, p < .001, \eta^2 = .83$), and Time ($F(16, 192) = 7.8, p < .001, \eta^2 = .40$). Significant first-order interactions appeared for Offset x Geometry ($F(4, 48) = 5.7, p < .001, \eta^2 = .32$), Offset x Time ($F(8, 96) = 322.0, p < .001, \eta^2 = .96$), Gap Size x Time ($F(4, 48) = 151.6, p < .001, \eta^2 = .93$), and Geometry x Time ($F(8, 96) = 44.8, p < .001, \eta^2 = .79$). Significant second-order interactions appeared for Offset x Gap Size x Time ($F(8, 96) = 3.5, p < .01, \eta^2 = .22$) and Offset x Geometry x Time ($F(16, 192) = 4.1, p < .001, \eta^2 = .26$), while a third-order interaction appeared for Offset x Gap Size x Geometry x Time ($F(16, 192) = 1.9, p < .05, \eta^2 = .13$). As the interesting effects are captured by the overarching second-order and third-order interactions, we analyzed these using Scheffé post-hoc tests.

Analysis of the Offset x Gap Size x Time interaction (see Figure 4.2.8) indicated that the current deviation decreased during the last 3 seconds for both the positive and negative offsets conditions ($ps < .001$). Gap Size influenced the future passing position, with the participants gradually developing a bias towards a position slightly closer to the lead vehicle for the larger gap size. For each offset this Gap Size induced difference was significant during the last three seconds ($ps < .001$).

Analysis of the Offset x Geometry x Time interaction (see Figure 4.2.9) indicated that over the last three seconds of the 0-m offset conditions participants headed for a future passing position further away from the lead vehicle in the closed-angle geometry than in the perpendicular-angle geometry ($ps < .01$). Similarly, over the last two seconds of the 0-m offset conditions participants headed for a future passing position closer to the lead vehicle in the open-angle geometry than in the perpendicular-angle geometry ($ps < .05$). In the -0.625-m offset conditions, over the last three seconds participants headed for a future passing position further away from the lead vehicle in the closed-angle geometry than in

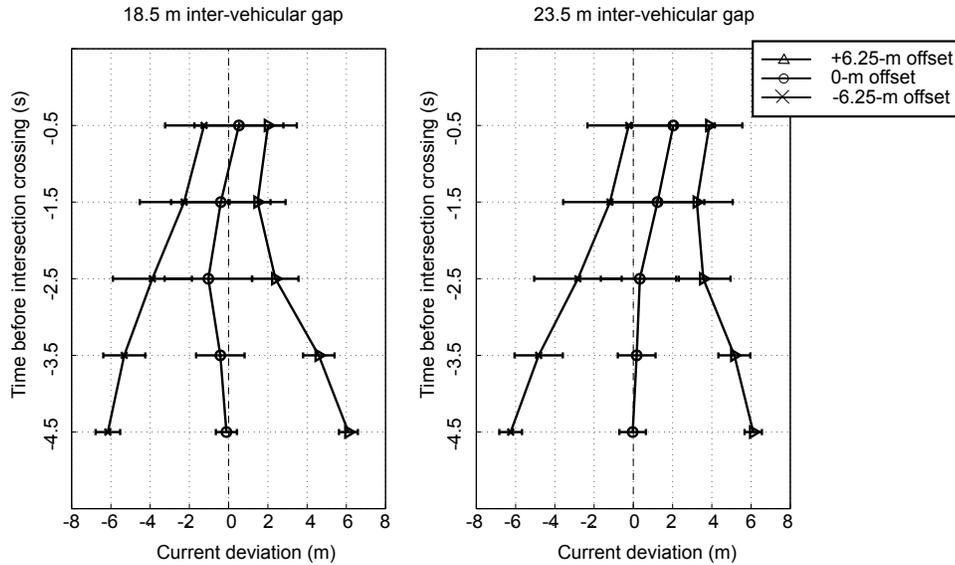


FIGURE 4.2.8 – Current deviation in the three offset conditions as a function of time for the small (left) and large (right) gap sizes. Dashed lines represent the inter-vehicular gap’s center.

the perpendicular-angle and opened angle geometries ($ps < .001$). In the +0.625-m offset conditions , over the last three seconds participants headed for a future passing position further away from the lead vehicle in the closed-angle geometry than in opened angle geometry ($ps < .05$).The Offset x Gap Size x Geometry x Time interaction resulted from the fact that these effects were magnified for the larger gap size.

Discussion

This study was designed to provide a better understanding of the perceptual-motor mechanisms underlying the control of the approach phase when crossing an intersection. While the majority of the studies performed so far focused on the perceptual process underlying the crossing maneuver, we decided rather to examine the behavioral regulations produced by a driver actively engaged in the task, with the idea that these regulations would allow us to better identify the underlying mechanisms. The participants were asked to perform a crossing task, while both task (gap size and initial offset with respect to arrival at the intersection) and environment (intersection geometry) constraints were manipulated.

Taken together the results revealed systematic behavioral regulations allowing the participants not only to succeed in the task, but also to minimize the risk of collision. These regulations are discussed in the following sections in relation to the different types of experimental factors manipulated.

Offset

Offset manipulations were designed to lead the participants to produce different kinds of displacement regulations. While maintaining the initial velocity still allowed the participants to succeed on the task in all experimental conditions, they would have crossed the traffic gap close to the lead vehicle in the +6.5-m offset condition and close to the trail vehicle in the -6.5-m offset condition. The results revealed systematic velocity regulations consistently leading the participants to cross the intersection near the centre of the traffic gap, albeit with a small bias towards early arrival under all conditions. This systematic behavior

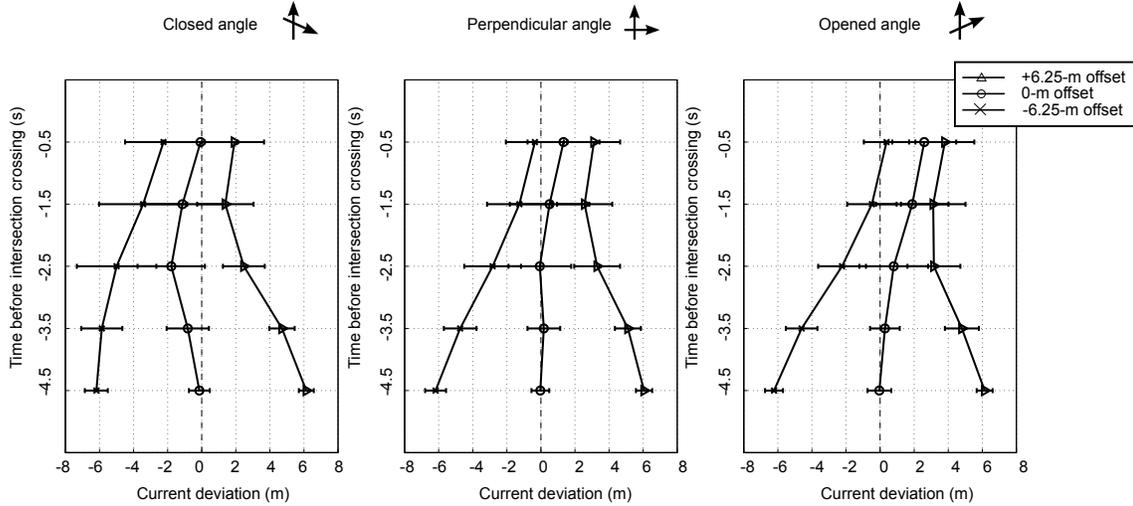


Figure 4.2.9: Current deviation in the three offset conditions as a function of time for the closed-angle (left), perpendicular angle (middle) and opened-angle (right) intersection geometries. Dashed lines represent the inter-vehicular gap's center.

reveals a safe-passing strategy, allowing the participants not only to avoid a collision, but also to benefit from an optimal temporal window to clear the intersection. Inspection of both the velocity and current deviation profiles revealed interesting information with respect to the way the participants accomplished the task. Rather than producing last-second changes, participants initiated velocity regulations early on (up to 4-5 s before crossing), distributing the adjustments over the course of approach. The observed changes in velocity were clearly functional as they allowed the current deviation to converge gradually towards the intended value. Such early-initiated and gradual convergence of current deviation towards the intended value has generally been taken to reflect the operation of a perception-action coupling type of control (e.g., [Peper et al., 1994](#); [Chardenon et al., 2005](#); [Montagne et al., 1999, 2003](#)). [Chihak et al. \(2010\)](#) observed a rather similar pattern of continuous displacement adjustments in a bicycling task in which children and adults had to cross an intersection by passing through an inter-vehicular gap. Continuously adapting behavior on the basis of perceptual information allows homing-in on the spatiotemporal requirements of the final objective, in this case that of crossing the intersection near the middle of the traffic gap. Precisely identifying the perceptual information involved in the regulation process falls outside the scope of the present contribution. Nevertheless, the way in which intersection geometry influences the velocity adjustments does allow us to suggest certain options (cf., discussion of Geometry §).

Gap size

Gap size manipulations affected not only gap crossing location but also the evolution over time of participants' speed and current deviation. The participants took advantage of a wider inter-vehicular gap by crossing the gap slightly earlier. Again, this systematic bias towards early crossing may be interpreted as arising from a safe crossing strategy : a change in task constraints (e.g., an increase of the gap) allowed for crossing the gap in the traffic train at a crossing location that ensured safe clearing of the intersection. As already mentioned in the previous section these precise adaptations were not brought about by last-second adjustments but resulted from early regulations initiated more than three

seconds before crossing and distributed throughout the approach phase.

Geometry

While initial offset and gap size affected the task constraints, requiring condition-specific control of the moment of passing, intersection geometry did not. Offset and gap size imposed the same task constraints in all three intersection geometries. Hence, the observed geometry-induced differences in intersection approach behavior cannot be explained by the task requirements. For a given set of spatial-temporal constraints the effects of intersection geometry must therefore be understood as resulting from perceptual differences. Indeed, intersection geometry (opened-angle, perpendicular or closed-angle; cf., Figure 4.2.2) affects the patterns of optical change that underlie the visual control of approach to the intersection. Interestingly our results revealed that intersection geometry influenced both gap crossing location as well as the evolution over time of participants' speed and current deviation. In the open-angle geometry participants crossed the traffic gap earlier (i.e., closer to the lead vehicle) than in the closed-angle geometry while geometry-specific speed adjustments were initiated at different times before crossing. Interestingly, similar patterns of results have been reported in a large number of studies in which participants have to regulate walking velocity so as to intercept a horizontally moving target when it crosses the axis of locomotion. These studies have demonstrated that such interception behavior could rely on a very simple source of perceptual information : the rate of change in bearing angle. The bearing angle is defined at the point of observation as the horizontal optical offset of the target with respect to the agent's displacement direction. Without requiring any further knowledge of the situation, simply canceling any change in bearing angle allows the agent to intercept the target (Chapman, 1968). Numerous studies have provided empirical and theoretical support in favor of the use of a constant bearing angle strategy when intercepting a moving target (e.g., Lenoir *et al.*, 2002; Chardenon *et al.*, 2004; Bastin *et al.*, 2006b). Particularly interestingly for the present purposes are the results of Chardenon *et al.* (2005) who demonstrated that the angle of approach of a target following a rectilinear trajectory affected the pattern of movement regulations (e.g., time of occurrence and amplitude) in an interceptive task. For a given interception location, an opened-angle trajectory gave rise to both earlier and more pronounced regulations than a closed-angle trajectory. This result is consistent with the use of a strategy based on cancelling changes in the rate of change in bearing angle, because an opened-angle approach geometry amplifies changes in bearing angle that can consequently be detected earlier. In the light of this body of results, it is tempting to consider that in the present study a similar kind of perceptual information — the rate of change in bearing angle of the center of the traffic gap— could have been used by our participants to intercept a moving gap. The particulars of the participants' behavior on the opened-angle intersection geometry could then reflect the fact that it magnifies the rate of change in bearing angle, thereby leading to earlier and more pronounced regulations.

Conclusion

Taken together our results demonstrate drivers' sensitivity to the manipulation of both task and environment constraints. Each individual manipulation gave rise to specific adaptations allowing the participants to fulfill the task requirements, while adopting a safe behavior. More importantly, under all experimental conditions, behavioral adaptations systematically implied gradual adjustments initiated early on and distributed throughout the approach to the intersection. Such regulations, already demonstrated in a number of interceptive tasks (e.g., Chardenon *et al.*, 2002), are taken to reflect the operation of a

perception-action coupling type of control. As hypothesized, these results legitimate the use of experimental paradigms that preserve the natural links between perception and action when investigating the mechanisms underlying the control of crossing tasks (see [Bootsma, 1989](#); [Oudejans *et al.*, 1996a, 1999](#); [Cornus *et al.*, 1999](#), for the same conclusion with other tasks). The present study also provides a first step towards the identification of the perceptual information involved in the control of the approach phase in intersection crossing tasks. The rate of change in bearing angle of the center of the moving traffic gap is a good first candidate, even though further experiments are necessary not only to identify precisely the causal role of this perceptual information in the regulation process but also to determine to which part of the moving gap the bearing angle is related.

Chapitre 5

Quel support perceptif pour quelle variable optique ?

5.1 Synthèse

Dans l'étude précédente nous avons montré que le comportement des conducteurs à l'approche d'une intersection était régulé de façon continue et selon un patron de régulation proche de celui mis au jour dans le cadre d'une interception de cibles se déplaçant horizontalement. En effet, traverser une intersection au sein d'un créneau libre du trafic peut être considéré comme une tâche d'interception d'une fenêtre temporelle disponible pour la traversée. Dans le cas des tâches d'interception de mobile se déplaçant sur le plan horizontal, l'information qui semble être particulièrement utilisée est le taux de changement de l'angle de relèvement séparant la direction du participant et la cible à intercepter. ([Bastin et al., 2006b](#); [Chardenon et al., 2002](#); [Fajen et Warren, 2007](#); [Ni et Andersen, 2008](#)). L'utilisation de cette information simple permet d'assurer une interception réussie si l'angle de relèvement est maintenu constant au cours du temps. Autrement dit, l'annulation des variations d'angle de relèvement à chaque instant permet d'intercepter la cible (Constant Bearing Angle strategy, CBA). L'utilisation d'une telle stratégie est particulièrement compatible avec une stratégie d'ajustement continu et graduel de la vitesse de déplacement, comme cela a été observé dans notre précédente étude, mais aussi dans une étude similaire portant sur la conduite d'un vélo lors de la traversée d'une intersection ([Chihak et al., 2010](#)).

L'intérêt d'une analogie entre la tâche de traversée d'intersection à l'intérieur d'une fenêtre du trafic et les tâches d'interception est de pouvoir former des hypothèses théoriquement fondées sur le comportement des conducteurs. Néanmoins, cette analogie pose le problème de la contribution spécifique de chaque élément de cette fenêtre dans les régulations comportementales. En effet, d'une part cette fenêtre est constituée de deux bornes indépendantes que sont les véhicules chasseur et lièvre (contributions perceptives locales) et d'autre part, ces deux bornes forment un tout qui correspond à la fenêtre en tant que telle (contribution perceptive globale). Chacun de ces éléments peut constituer le support d'une information visuelle qui pourrait être impliquée dans les régulations du comportement. Les précédentes études s'intéressant à la régulation continue de l'approche de l'intersection ([Louveton et al., 2012a](#); [Chihak et al., 2010](#)) ne permettent néanmoins pas de faire la distinction entre les contributions spécifiques de

chaque élément de la fenêtre inter-véhiculaire. Pourtant, connaître la contribution spécifique de chaque élément de la fenêtre permettrait d'une part, de focaliser de futures recherches concernant l'information utilisée sur les éléments les plus pertinents de la situation et d'autre part, d'aider à clarifier l'utilisation potentielle de cette information : c'est-à-dire son utilité soit pour intercepter la fenêtre, soit pour éviter une collision avec les véhicules formant cette fenêtre. Dans cette étude, nous avons donc manipulé de façon indépendante les contributions perceptives globales (relatives à la fenêtre inter-véhiculaire) et locales (relatives aux bornes de la fenêtre) afin d'en déterminer le rôle causal dans les régulations observées à l'approche de l'intersection.

Afin de répondre à cette question, nous avons à nouveau utilisé le paradigme expérimental de la première expérience, dans lequel nous avons manipulé trois facteurs expérimentaux. Le facteur Offset qui correspond à un décalage du point de départ qui aboutit, à vitesse initiale stabilisée, à différents lieux d'arrivée dans la fenêtre inter-véhiculaire (offsets de -10 mètres : arrivée tardive, 0 mètre : arrivée au centre de la fenêtre, ou +10 mètres : arrivée précoce). Le facteur cinématique du véhicule lièvre ("Lead Vehicle Motion characteristics") et le facteur cinématique du véhicule chasseur ("Trail Vehicle Motion characteristics") correspondent à la manipulation indépendante de l'accélération de ces deux véhicules. En effet, bien que les contraintes spatiales et temporelles soient toujours les mêmes au moment de la traversée (véhicules du trafic arrivant à 15 m/s et taille de la fenêtre inter-véhiculaire de 35 mètres), les deux véhicules peuvent rouler indépendamment à vitesse constante (15 m/s), accélérer (départ plus éloigné de l'intersection à 9.5 m/s et accélération continue de 1m/s pendant 5.5 secondes) ou décélérer (départ plus proche de l'intersection à 20.5 m/s et décélération continue de 1m/s pendant 5.5 secondes). Ces variations expérimentales produisent une dynamique spécifique des contributions locales, car elles affectent la cinématique des deux véhicules du trafic sans affecter les contraintes de la tâche, mais produisent aussi une dynamique spécifique des contributions globales, car elles modifient la cinématique du centre de gravité de la fenêtre (vitesse médiane des deux véhicules) et sa taille (expansion ou contraction). De plus, la dynamique des contributions globales peut être affectée soit par un seul des deux véhicules ("one-side contribution") soit par les deux en même temps ("two-side contribution"). Toutes ces dynamiques sont croisées entre elles dans un plan factoriel complet. Comme dans l'expérience précédente, nous étudions la position de traversée à l'intérieur de la fenêtre inter-véhiculaire et les profils de vitesse et de déviation courante.

Les résultats de cette étude confirment tout d'abord ceux déjà observés dans l'expérience précédente. En effet, les participants s'adaptent aux différentes contraintes temporelles imposées par le facteur "Offset" de façon progressive et durant toute la tâche. Les résultats montrent également que les participants sont influencés à la fois par les contributions locales et globales. Du point de vue des contributions locales, il est clairement démontré que la cinématique du véhicule lièvre joue un rôle prépondérant dans l'ajustement de la vitesse de déplacement par rapport à celle du véhicule chasseur (dont l'effet est toutefois statistiquement significatif). Du point de vue des contributions globales, une analyse de tendance linéaire montre d'une part que l'accélération globale influence le comportement des participants : ceux-ci traversent plus loin du véhicule lièvre quand le centre de gravité de la fenêtre accélère que quand il décélère et cet effet est plus important quand les deux véhicules contribuent ensemble à l'accélération (ou à la décélération). D'autre part, la même analyse révèle que la taille de la fenêtre influence aussi le participant : ceux-ci traversent plus loin du véhicule lièvre quand la fenêtre est en contraction que quand elle est en expansion, et cet effet est plus important quand les deux véhicules contribuent à la contraction (ou à l'expansion) de l'intervalle. Le fait que les effets observés soient plus forts quand les

deux véhicules contribuent à la dynamique de la fenêtre démontre qu'ils ne sont pas un sous-produit de la cinématique du véhicule lièvre (particulièrement au niveau de l'effet de la cinématique globale de la fenêtre) et que la fenêtre prise comme une entité en tant que telle joue bien un rôle dans la régulation du comportement.

Ces résultats soulignent à nouveau l'importance du contrôle continu du déplacement dans la tâche de traversée d'intersection. Ils mettent aussi en évidence le fait que les contributions locales et globales jouent un rôle spécifique sur le comportement des participants. Ce dernier point semble confirmer l'hypothèse d'une mise en œuvre complémentaire de deux stratégies : d'une part, une stratégie d'interception fondée sur les contributions perceptives globales et d'autre part, une stratégie d'évitement de collision fondée sur les contributions perceptives locales. En effet, le fait que les participants modulent leur vitesse principalement en fonction du véhicule "lièvre" (i.e., le véhicule qui "ouvre" la fenêtre) et la façon dont ils maximisent leur marge de sécurité vis-à-vis des caractéristiques globales de la fenêtre semblent favoriser, de façon complémentaire, un comportement de traversée sécurisé.

A cet égard, nous pouvons proposer des hypothèses concernant les invariants qui seraient utilisées pour les deux types de stratégie. En effet, dans le cadre d'une stratégie d'interception le fait que les participants aient régulé leur vitesse en fonction de la cinématique "globale" de la fenêtre nous laisse penser qu'ils auraient utilisé une stratégie CBA fondée sur un angle de relèvement référé soit au centre de la fenêtre inter-véhiculaire soit à un autre point qui lui serait proche. De même, les régulations comportementales consécutives aux variations de taille de la fenêtre suggèrent que la taille optique sous-tendue par la fenêtre serait utilisée par les participants et particulièrement qu'elle pourrait spécifier le temps restant avant de pouvoir atteindre la fenêtre et la traverser. Dans le cadre d'une stratégie d'évitement de collision, nous pouvons faire soit l'hypothèse de l'utilisation d'une stratégie CBA "inversée" et dont l'angle de relèvement serait référé aux véhicules du trafic (cf., en navigation maritime [Le Brun et al., 2007](#)), soit l'hypothèse de l'utilisation de la taille optique sous-tendue par les véhicules du trafic et plus particulièrement par celle du véhicule lièvre.

Au final, ces résultats mettent l'accent sur l'utilisation potentielle de deux stratégies complémentaires (i.e., interception et évitement de collision) dont il faudrait mettre en évidence les informations qui permettent leur mise en œuvre. Concernant l'hypothèse de la stratégie d'interception de la fenêtre inter-véhiculaire, la plausibilité respective des deux informations potentiellement utilisées (i.e., taux de changement de l'angle de relèvement référé au centre de la fenêtre et taille optique sous-tendue par celle-ci) pourrait être évaluée par une modélisation numérique du comportement (cf., Annexe C). Par ailleurs, concernant l'hypothèse de la stratégie d'évitement de collision, une nouvelle expérience pourrait permettre de déterminer l'importance de l'angle de relèvement référé aux véhicules du trafic vis-à-vis de la taille optique sous-tendue par ceux-ci. Ainsi, dans l'expérimentation suivante nous testerons l'effet de la manipulation de la taille optique (et de son taux de changement) des véhicules du trafic (contributions perceptives locales) de façon indépendante des contraintes réelles de la tâche de traversée. Une telle démarche devrait permettre soit de corroborer l'hypothèse d'une utilisation exclusive du taux de changement de l'angle de relèvement dans la stratégie d'évitement d'une collision avec les bornes de la fenêtres du trafic, soit au contraire de l'atténuer et de montrer la pertinence de la taille optique des véhicules (et leur expansion optique) comme information dans la tâche de traversée.

5.2 Manuscrit de l'étude

Introduction

Intersections are particularly dangerous sectors of the traffic infrastructure as it is here that the trajectories of potential users meet. When a driver (operating a car, motorbike, bicycle or other means of terrestrial transportation) approaches an intersection, s/he must therefore control the spatio-temporal characteristics of the vehicle's trajectory so as to avoid colliding with incoming traffic. One strategy is to come to a full stop just before the intersection every single time (even if this is not imposed by local traffic regulations). From this point on, the stationary driver should then wait until s/he detects a gap in the train of incoming traffic that is judged to be sufficiently large to allow safe passage across the intersection. While most research on intersection crossing has studied the task from this (static) perspective (see [Caird et Hancock, 2002](#), for a review), the stop-and-judge strategy is not representative of the natural behaviour observed (cf., [Chihak et al., 2010](#)). Indeed, the alternative strategy is to regulate the speed of approach in such a way that the driver arrives at the intersection at the same time as the selected traffic gap. This regulated-approach strategy is not only more efficient, as it requires less abrupt changes in speed, but also safer, as it allows the driver to cross the intersection at higher speeds thereby clearing the intersection more rapidly. Moreover, a dynamic situation (i.e., with a moving agent) appears to allow a better framework for decision-making than a static situation ([Oudejans et al., 1996b,a](#); but see [Fajen et al., 2011](#)). Notwithstanding its ubiquity in every-day intersection-crossing behaviour, studies addressing the perceptuo-motor mechanisms underlying the regulated-approach strategy have only appeared recently.

[Louveton et al. \(2012a\)](#) and [Chihak et al. \(2010\)](#) studied the spatio-temporal patterns of approach to an intersection with incoming traffic in situations where participants drove a car or rode a bicycle, respectively. Both these studies independently conceived of the task as that of intercepting a moving gap, drawing their inspiration from work on intercepting moving objects. Indeed, regulation of locomotor speed so as to intercept a moving object when it crosses the agent's path has been extensively studied ([Lenoir et al., 1999](#); [Bastin et al., 2010, 2006a](#); [Chardenon et al., 2004, 2005, 2002](#); [François et al., 2011](#); [Lenoir et al., 2002](#); also see [Fajen et Warren, 2004, 2007](#) for regulation of locomotor direction). Not only have these studies demonstrated the continuous and progressive nature of the speed changes effected, but they have also pointed out the role of (changes in) bearing angle —eccentricity of the object with respect to the agent's displacement axis— in the regulation of approach speed.

A clear benefit of the proposed analogy between intercepting a moving object and intercepting a moving gap is that it allows formulating theoretically-founded hypotheses with respect to the expected effects of particular manipulations of the task and its settings. For instance, an interception strategy based on zeroing out changes in (perceived) bearing angle predicts effects of intersection geometry, as reported by [Louveton et al. \(2012a\)](#). Nevertheless, considering a gap as an object that can be intercepted raises ontological issues. Indeed, a gap is formed by two boundaries, that is, by the borders of two objects. One may therefore ask whether the gap is perceived as such —as an entity— or whether it is but a by-product of the perception of the two objects that form the gap. In the more concrete framework of intersection crossing, this question can be reformulated as follows: Is intersection crossing based on intercepting a moving gap in the train of traffic or is it based on avoiding collision with the individual vehicles constituting the traffic train?

In order to answer this question, it is first necessary to assess the specific impact of local (individual

gap boundaries here formed by the traffic vehicles) and global (gap-related) contributions on speed regulations. This can be achieved only by manipulating independently both levels of contribution under equal spatial and temporal constraints. In this respect the existing studies do not allow answering this question. In both [Louveton *et al.* \(2012a\)](#) and [Chihak *et al.* \(2010\)](#) studies all elements of the traffic train always moved at the same constant speed over the course of a trial: This methodology did not allow to observer specific speed regulations toward one of the two traffic vehicles (local boundaries-related contributions) or a particular dynamic of the gap itself, such as changes in velocity or in inter-vehicular distance (global gap-related contributions). In the same way, [Watson *et al.* \(2011\)](#) studied participants' judgements of the possibility of passing through a shrinking gap between two approaching defenders in a virtual rugby situation. However, because the gap was changed by equal and symmetrical lateral movement of both simulated defenders, the study's design again does not allow separating out the effects of local (here formed by the defenders) and global contributions (see also [Fajen *et Matthis*, 2011](#)).

The present experiment was therefore designed to unconfound the effects of local and global contributions, in order to separate out their effects on the regulation of approach speed to an intersection with incoming traffic. To this end, we reinvested [Louveton *et al.* \(2012a\)](#) intersection-crossing task, this time independently manipulating the motion characteristics of the lead and trail boundaries forming the traffic gap that participants had to attempt to pass through (in a way quite similar to the uncoupled opening/closing doors-passing task of [Cinelli *et al.*, 2009](#)) Independently both the Lead Vehicles (LV) and the Trail Vehicles (TV) could be accelerating, moving at constant speed, or decelerating. At the local level, we can thus evaluate the effects of LV and TV motion conditions. The combined LV and TV motion conditions affect the gap at the global level, in terms of both its size and speed. By varying these conditions orthogonally (see [Table 5.2.2](#)) the design of the present study allows us to distinguish the local (LV- or TV-based) and global (gap-based) contributions to the control of speed during approach to the intersection. More precisely, observing a differentiated behaviour in regard to manipulated acceleration of the lead or the trail vehicle will support the hypothesis of a boundaries-related control of behaviour and so, the hypothesis of a collision avoidance strategy. On the other side, observing specific speed regulations related to gap's dynamic manipulation (gap's velocity and gap's size) will support the hypothesis of a gap-related control of behaviour and so, the hypothesis of an interception strategy. Indeed, we combined these different conditions in a way that gap's size conditions are independent of gap's acceleration and vehicles that are involved in this acceleration and conversely, gap's acceleration conditions are independent of gap's size conditions and vehicles that are involved in these changes of gap's size (see [Table 5.2.2](#)).

Concerning the relation between inter-vehicular gap's dynamic (both at local and global contributions level) and speed regulations we make the assumption that participants will cross the traffic gap further ahead of the traffic gap centre when the gap or incoming vehicles are accelerating than when they are decelerating (see [Dewing *et al.*, 1993](#)). Finally, we also make the assumption that participants will cross the traffic gap further ahead of the traffic gap's centre when the gap size is expanding than when it is reducing (global contribution only; see also [Louveton *et al.*, 2012a](#)).



Figure 5.2.1: Illustration of the experimental setting (left panel) and the task's visual rendering as presented to the participants (right panel). The task was to cross the intersection using the gap between the two cars.

Methods

Participants

Fifteen participants (25.0 ± 3.1 years old; $m \pm sd$) with normal or corrected to normal vision volunteered for participation in the experiment. They all held a driver's license for at least three years, with an average duration of 6.5 ± 3.0 years.

Apparatus and visual environment

Participants drove a fixed-base SIM2 driving simulator (cf., Figure 5.2.1, left panel) equipped with a car seat, a steering wheel, and a set of accelerator and brake pedals. The drivers' visual environment was generated using the ARCHISIM (2009 release) software package (Espie et Saad, 2000; Espie et Auberlet, 2007). Using three PLUS projectors operating at 60 Hz, the visual scene was presented on three planar screens with the left and right screens oriented inward so as to sustain a total horizontal visual angle of 150° for a vertical visual angle of 40° . Participants drove on a conventional two-lane 7-m wide textured road through a flat rural environment (see Figure 5.2.1, right panel). The driving simulator implemented an automatic transmission so that participants did not have to shift gears. The participant's car was 3.45 m long and 1.55 m wide, with the viewpoint located 1.15 m from the ground.

Task and procedure

In order to familiarize the participants with the simulator, they first performed a following task, consisting of attempting to remain at a constant distance of two central line segments behind a car moving in front. The latter changed speed regularly, moving at 50, 60 or 70 km/h during 4, 6, or 8 second periods. Speed levels and durations were randomly combined into a sequence of eight min. Accelerating, decelerating, and maintaining velocity during this following task allowed the participant to discover the action capabilities of the simulated vehicle driven. Following this familiarization phase and a short break, the experimental phase was started.

During the experimental phase the participants' task was to safely cross an intersection formed by two perpendicular straight roads. During approach to the intersection the participant was confronted with a four-vehicle traffic train coming from the left. This traffic train consisted of a truck, two cars and another truck (see Figure 5.2.1, right panel). Participants were to cross the intersection using the gap between the two cars (i.e., the traffic gap). In the absence of any horizontal or vertical traffic signs, no information with respect to priority was provided.

Two aspects of the situation were experimentally manipulated: the motion characteristics of the gap's lead and trail vehicles and the initial position of the driver. The lead vehicles (LV) and the trail vehicles (TV) could independently accelerate ($+1 \text{ m/s}^2$), maintain constant speed (0 m/s^2), or decelerate (-1 m/s^2) throughout a trial. Initial conditions were chosen such that at the moment of arrival of the traffic train's (geometrical) centre at the intersection, 5.5 s after initiation of the intersection-crossing scenario, LV and TV were always both travelling at a speed of 15 m/s for an inter-vehicular distance of 35 m corresponding to a temporal gap of 2.33 s.

Contribution	Gap Size	Gap Speed	LV Acc	LV V0	LV D0	TV Acc	TV V0	TV D0
Both Sides	Constant	Accelerating	1	9.5	49.875	1	9.5	84.875
Lead Side	Contracting	Accelerating	1	9.5	49.875	0	15	100
Both Sides	Contracting	Constant	1	9.5	49.875	-1	20.5	115.125
Trail Side	Expanding	Accelerating	0	15	65	1	9.5	84.875
–	Constant	Constant	0	15	65	0	15	100
Trail Side	Contracting	Decelerating	0	15	65	-1	20.5	115.125
Both Sides	Expanding	Constant	-1	20.5	80.125	1	9.5	84.875
Lead Side	Expanding	Decelerating	-1	20.5	80.125	0	15	100
Both Sides	Constant	Decelerating	-1	20.5	80.125	-1	20.5	115.125

Table 5.2.1: Conditions of Lead Vehicle (LV) and Trail vehicle (TV) motion: All the different combinations of Acceleration (Acc in m/s^2), initial velocity (V0 in m/s), and initial distance from the intersection (D0 in m) resulted in a LV and TV speeds of 15 m/s and in an inter-vehicular distance of 35 m at the moment of arrival of the traffic gap centre at the intersection.

As can be seen from Table 5.2.1, an accelerating vehicle therefore started the trial at a lower speed and a decelerating vehicle at a higher speed. Given that an accelerating vehicle travelled at a lower mean speed and a decelerating vehicle at a higher mean speed over the 5.5 s interval, it started from, respectively, a shorter or longer initial distance from the intersection.

The second factor manipulated was the participant's initial distance from the intersection, so as to create an offset between the anticipated moment of arrival at the intersection of the participant and the moment of arrival of the centre of the traffic gap. To this end, the participant's distance from the intersection was set to 104, 88, or 72 m at the onset of the intersection-crossing scenario. This occurred once the participant had stabilized the car's velocity (see below). If the participant would continue at the stabilized velocity ($16 \text{ m/s} = 57.6 \text{ km/h}$), s/he would arrive at the intersection with a temporal offset of -1 s (Late Offset), 0 s (No Offset), or +1 s (Early Offset) with respect to the centre of the traffic gap (corresponding to a spatial offset of -15 m, 0 m, or +15 m from the traffic gap centre, respectively). Thus, in the No Offset condition participants did not need to change their velocity to cross the intersection safely. In contrast, in Late or Early Offset conditions they had to increase or decrease their velocity during approach to the intersection in order to avoid (near) collision with the LV or TV, respectively, arriving at the intersection at distances of -17.5 m and +17.5 m from the traffic gap's centre.

At the beginning of each trial, participants found themselves parked (i.e., with zero velocity) in the middle of their lane, without any other vehicles in sight. They started the car's engine and operated the accelerator pedal in order to attain a required velocity indicated by a speedometer placed directly in front of them. Their current speed was indicated by the needle's location and the required speed by a red zone on the dial, without any numerical information being provided. Speed had to be stabilized within the indicated zone. An 80-m long stretch of empty road was available for the initial acceleration and subsequent stabilization of speed. If the participant's car speed remained within the delimited zone

(corresponding to 16.0 ± 0.69 m/s = 57.6 ± 2.5 km/h) over the last 20 m of the 80-m stretch, the speed dial disappeared and the intersection scenario was started, with the four-vehicle traffic train appearing on the left. If not, the trial was restarted. In case the driver did not pass between the traffic vehicles (colliding with one of them or braking so as to let the full four-vehicle traffic train pass) a large red triangle was presented. Combining three acceleration conditions of both the lead and trail vehicles, and three driver-position offsets, an experimental block consisted of $3 \times 3 \times 3 = 27$ trials. Each participant performed five blocks of 27 trials for a total of 135 trials. The order of presentation of the 27 different conditions was randomized within each block.

Data analysis

Intersection crossing was analyzed via the position of the participant within the traffic gap at the moment of crossing. Taking the (geometrical) centre of the gap as the reference, a negative crossing position indicated crossing after the centre of the gap (i.e., closer to the trail vehicle) while a positive crossing position indicated crossing before the centre of the gap (i.e., closer to the lead vehicles). In order to examine the nature of the velocity adjustments effected during approach to the intersection, we analyzed the time course of participant's velocity and its instantaneous effect on future passing position within the traffic gap, allowing a functional interpretation of the observed velocity adjustments. As in [Louveton *et al.* \(2012a\)](#) the latter was operationalized through the current deviation (CD) from the traffic gap centre, calculated as the spatial or temporal distance from the centre of the traffic gap at which the participant would pass the intersection if the current velocity were to remain constant. In the No Offset condition, continuing at the initial (stabilized) velocity would lead the participant to pass right in the centre of the traffic gap. Thus, at the start of a No Offset trial, the temporal (spatial) current deviation (CD) was equal to 0 s (0 m). In the Late Offset condition, continuing at the initial velocity would lead the participant to pass 1 s / 15 m behind the centre of the traffic gap. Thus, at the start of a Late Offset condition CD was -1 s (-15 m). In the Early Offset condition, continuing at the initial velocity would lead the participant to pass 1 s / 15 m in front of the centre of the traffic gap. Thus, at the start of an Early Offset trial CD was +1 s (+15 m).

The time courses of velocity and temporal current deviation were analyzed in five time steps, by averaging each of these variables over five 1-s intervals synchronized with the final moment of passing the intersection (i.e., 5 to 4 s, 4 to 3 s, 3 to 2 s, 2 to 1 s, 1 to 0 s before the participant arrived at the intersection).

Statistical analyses

In this study we distinguish between local effects, related to the kinematics of the individual lead and trail vehicles, and global effects, related to the kinematics of the traffic gap formed by these two vehicles (see [Table 5.2.2](#)). Local effects are produced by the acceleration, constant speed, or deceleration of the LV and TV separately. Global effects are produced by the resulting overall behaviour of the traffic gap, with changes in both its size and speed (see [Table 5.2.1](#)).

Local effects were evaluated using standard Analyses of Variance (ANOVA) with repeated measures on the factors Offset (3 levels), LV Motion (3 levels), TV Motion (3 levels), and (when appropriate) Time Step (5 levels).

Global effects were evaluated using a special-purpose (linear-model) ANOVA with eight independent comparisons on a flattened experimental design, reduced to the nine experimental conditions reported

Gap's kinematic	LV Deceleration	LV Constant Speed	LV Acceleration
TV Deceleration	Both Sides Decelerating	Trail Side Decelerating	Constant Speed
TV Constant Speed	Lead Side Decelerating	Constant Speed	Lead Side Accelerating
TV Acceleration	Constant Speed	Trail Side Accelerating	Both Sides Accelerating
Gap's size	LV Deceleration	LV Constant Speed	LV Acceleration
TV Deceleration	Constant Gap's Size	Trail Side Contracting	Both Sides Contracting
TV Constant Speed	Lead Side Expanding	Constant Gap's Size	Lead Side Contracting
TV Acceleration	Both Sides Expanding	Trail Side Expanding	Constant Gap's Size

Table 5.2.2: Matrix of Lead Vehicle (LV) and Trail Vehicle (TV) motion conditions, leading to orthogonal combinations of gap speed and gap size conditions. Constant gap speed is obtained not only by combining constant LV and TV speeds, but also by combining LV acceleration with TV deceleration, and LV deceleration with TV acceleration. Constant gap size is obtained not only by combining constant LV and TV speeds, but also by combining LV acceleration with TV acceleration, and LV deceleration with TV deceleration. Changes in gap speed (increasing or decreasing) or in gap size (expanding or contracting), resulting from the contribution of the lead side, trail side or both sides, are obtained by the other combinations.

in Table 5.2.1 (Nine combinations of LV/TV conditions yield eight degrees of freedom and thus allow for eight possible statistical tests). Each comparison is a specific hypothesis characterised by a set of nine (centred and orthogonal) contrast codes that map onto the nine combinations of LV/TV conditions (see Table 5.2.3). These contrast codes predict a relative gap crossing location for each nine combination of LV/TV: The zero code means a predicted gap crossing location at the center of the inter-vehicular gap while a negative code means a predicted gap crossing location behind the gap's centre and conversely, a positive code means a predicted gap crossing location ahead of the gap's centre. Each code values are relative to each others in the same contrast: For example, when an experimental condition is coded with the "1" value that means that we predict a gap crossing location to be further ahead in this condition than in a condition which is coded with the "0.5" value. The first two comparisons test two hypotheses related to the changes in traffic gap size (C1) and traffic gap speed (C2), respectively. The last six comparisons test residual contrasts (R0 to R5) to evaluate whether the variance that is not explained by the first two hypotheses is statistically significant (Judd *et al.*, 1995). C1 tests the hypothesis that participants will cross the traffic gap further ahead of the traffic gap's centre when the gap size is expanding than when it is reducing, and that this effect will be exaggerated when both LV and TV contribute to an increase or decrease in gap size compared to when only one vehicle contributes to the changing gap size. This hypothesis is based in Louveton *et al.* (2012a) observation that participants pass further ahead of the traffic gap's centre for larger gaps. C2 tests the hypothesis that participants will cross the traffic gap further ahead of the traffic gap centre when the gap is accelerating than when it is decelerating and that this effect will be exaggerated when both LV and TV contribute to an acceleration or deceleration of the gap compared to when only one vehicle contributes to the gap acceleration/deceleration. This hypothesis is based in Dewing *et al.* (1993) observation that the probability to initiate a left-turn manoeuvre at an intersection increases with the speed of incoming vehicles.

Note that the hypotheses with respect to an exaggeration of the effects when both vehicles contribute to a common change in traffic gap size or speed are critical to demonstrating that global level effects are actually due to the combination of both LV and TV's dynamics and not only to one of them (see effect of "one side" vs. "both sides" contributions on gap's dynamic in Figure 5.2.2).

Contribution	Gap Size	Gap Acceleration	C1	C2	R0	R1	R2	R3	R4	R5
Lead Side	Contracting	Accelerating	-0.5	0.5	0.5	0	-1.25	0	-0.2038	-1
Trail Side	Expanding	Accelerating	0.5	0.5	-0.5	0	-1.25	0	-1	0.2038
Trail Side	Contracting	Decelerating	-0.5	-0.5	-0.5	0	-1.25	0	1	-0.2038
Lead Side	Expanding	Decelerating	0.5	-0.5	0.5	0	-1.25	0	0.2038	1
Both Sides	Contracting	–	-1	0	0	0.5	1	0	-0.3981	-0.6019
Both Sides	Expanding	–	1	0	0	0.5	1	-1	0.3981	0.6019
Both Sides	–	Accelerating	0	1	0	-0.5	1	-1	0.6019	-0.3981
Both Sides	–	Constant Speed	0	0	0	0	1	4	0	0
Both Sides	–	Decelerating	0	-1	0	-0.5	1	-1	-0.6019	0.3981

Table 5.2.3: Orthogonal hypotheses used as predictors of the position of the driver in the traffic gap at the moment of crossing for a nine-conditions experimental design. Positive values refer to a position closer to the LV and negative values refer to a position closer to the TV.

Results

Success rate

All participants attempted to cross the intersection inside the traffic gap on all trials. On 11 out of a total of 2025 trials a participant collided with the lead or the trail vehicles. These rare (0.55%) collision trials were excluded from the analyses.

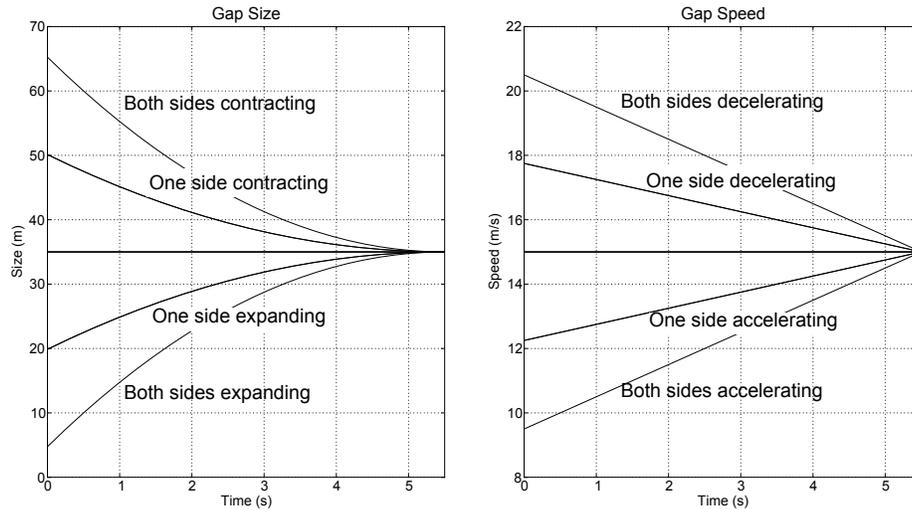


Figure 5.2.2: The evolution of the traffic gap’s size and speed as a function of the different experimental conditions (see Table 5.2.1 for details of conditions).

Local level analyses

Gap crossing position The position in the traffic gap at which participants crossed the intersection was on average slightly biased towards the lead vehicles, for a grand mean of 1.54 m (SD = 4.47 m). A repeated-measures ANOVA revealed significant main effects of the factors Offset ($F(2,28) = 140.7, p <$

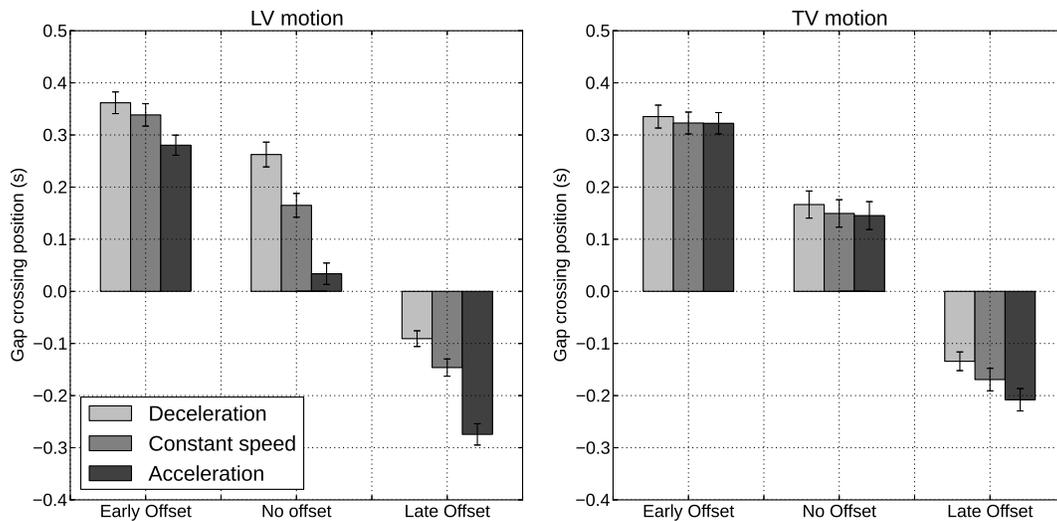


Figure 5.2.3: Gap crossing position as a function of the Offset for the different motion conditions of the Lead Vehicle (left panel) and Trail Vehicle (right panel).

.001, $\eta^2 = .91$), LV Motion ($F(2,28) = 150.7$, $p < .001$, $\eta^2 = .91$) and TV Motion ($F(2,28) = 6.7$, $p < .001$, $\eta^2 = .33$), and significant first-order interactions of Offset \times LV Motion ($F(4,56) = 8.2$, $p < .001$, $\eta^2 = .37$) and Offset \times TV Motion ($F(4,56) = 3.0$, $p < .05$, $\eta^2 = .18$).

Post-hoc Scheffé analyses of these interactions demonstrated ($ps < .05$) that Offset affected gap crossing position under all LV/TV Motion conditions (see Figure 5.2.3). Overall, participants crossed the intersection closer to LV in the Early Offset conditions than in the No Offset conditions, which in turn gave rise to a gap crossing closer to LV than in the Late Offset conditions. Gap crossing position was also affected by LV Motion. In the No Offset condition, a decelerating LV gave rise to a gap crossing position closer to LV than a constant-speed LV. The latter in turn gave rise to a gap crossing position closer to LV than an accelerating LV. Moreover, in the Early and Late Offset conditions, a decelerating LV gave rise to a gap crossing position closer to LV than a constant-speed or accelerating LV. The Scheffé test did not reveal significant effects of motion conditions for TV.

These effects demonstrated that participants compensate the initial offset (at least partly for the Late Offset condition) imposed by experimental conditions. They also evidenced that LV motion characteristics had a stronger impact on gap crossing location than TV motion characteristics (although statistically significant). Such an asymmetry in the impact of each traffic vehicles seems to support the hypothesis of a independent contribution of each vehicle on gap crossing location and thus the local level hypothesis.

Velocity profiles Velocity profiles were analyzed using a four-way repeated-measures ANOVA on the factors Offset, LV Motion, TV Motion, and Time. The results revealed main effects of all four factors: Offset ($F(2,28) = 1139.8$, $p < .001$, $\eta^2 = .99$), LV Motion ($F(2,28) = 156.2$, $p < .001$, $\eta^2 = .92$), TV Motion ($F(2,28) = 4.1$, $p < .05$, $\eta^2 = .23$), and Time ($F(4,56) = 37.6$, $p < .001$, $\eta^2 = .73$). Significant first-order interactions appeared for Offset \times LV Motion ($F(4,56) = 7.6$, $p < .001$, $\eta^2 = .35$), Offset \times

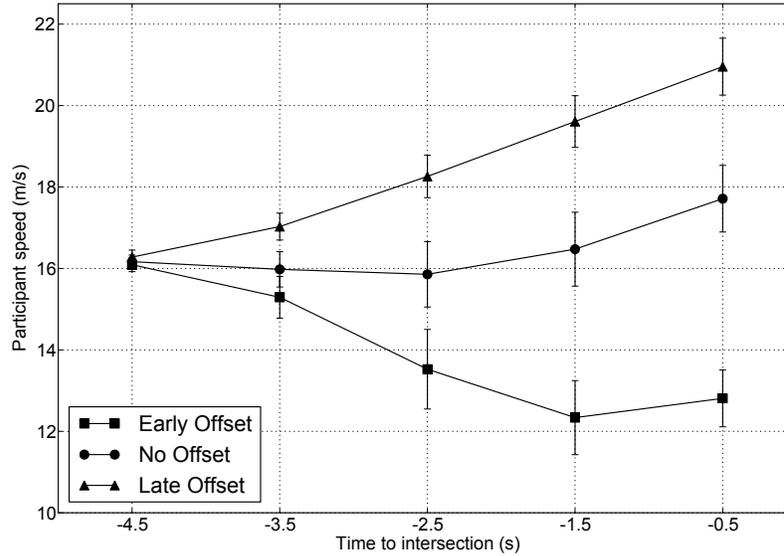


Figure 5.2.4: Average participant speed in the three Offset conditions as a function time before crossing the intersection.

TV Motion ($F(4,56)=3.1, p < .05, \eta^2 = .18$), Offset \times Time ($F(8,112) = 491.4, p < .001, \eta^2 = .97$), LV Motion \times Time ($F(8,112) = 38.8, p < .001, \eta^2 = .73$), and TV Motion \times Time ($F(8,112) = 3.1, p < .05, \eta^2 = .18$). Finally, a significant second-order appeared for Offset \times LV Motion \times Time ($F(16,224) = 12.5, p < .001, \eta^2 = .47$).

If participants were aiming for a position near the centre of the traffic gap, one would expect that they maintain their initial velocity in the No Offset conditions, accelerate in the Late Offset conditions and decelerate in the Early Offset conditions. Corroborating the findings of Louveton et al. (2011), the pattern of results (averaged over LV and TV Motion conditions) obtained in the present study again corresponded qualitatively to these expectations, as revealed by the analysis of the Offset \times Time interaction (see Figure 5.2.4). In the No Offset conditions participants maintained their velocity over the first few seconds, before systematically accelerating in the last few seconds before reaching the intersection. This behavioural pattern underlies the observed positive bias in crossing position (cf., Figure 5.2.3). In the Late Offset conditions participants progressively accelerated, from the first beginning of the approach until the moment of crossing. In the Early Offset conditions participants began by decelerating during the early stages of the approach, followed by a re-acceleration in the vicinity of the intersection.

As revealed by the LV Motion \times Time and TV Motion \times Time interactions, the participants' velocity profiles also systematically varied as a function of the motion characteristics of the lead and trail vehicles (see Figure 5.2.5), with LV Motion ($\eta^2 = .73$) having a larger effect than TV Motion ($\eta^2 = .18$). When the LV decelerated from a high initial speed, participants accelerated; when the LV accelerated from a low initial speed, participants decelerated in the initial stages of the approach before accelerating in the final stages of approach to the intersection. Both the LV acceleration and LV deceleration conditions significantly deviated from the constant-speed LV conditions from the third

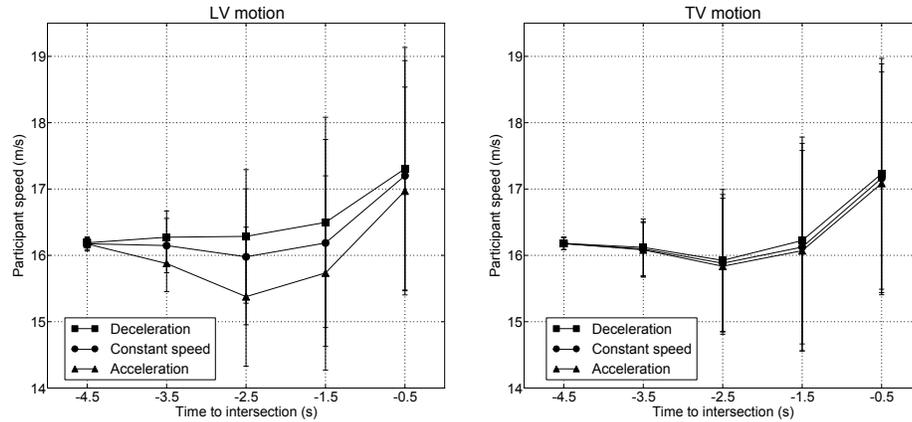


Figure 5.2.5: Average participant speed as a function of time before crossing the intersection in the three motion conditions of the Lead Vehicle (left) and the Trail Vehicle (right).

time-step onward (Scheffé post-hoc $ps < .05$). Although clearly attenuated, a similar pattern appeared for the TV motion conditions. TV acceleration and TV deceleration conditions differed significantly from the fourth time-step onward (Scheffé post-hoc $ps < .05$). Again, such an asymmetry in the relative effect of LV and TV motion characteristics on participants' speed of approach is likely to support a local level contribution based control of vehicle's approach.

The interactive effects of Offset with LV and TV Motion characteristics result from the fact that the Late Offset and LV/TV acceleration conditions affect the speed of approach differently than the Early Offset and LV/TV decelerations conditions. These effects are more clearly seen in the analysis of the current deviation.

Current Deviation Profiles Continuously extrapolating the current state of affairs to the future moment of passing the intersection, the variations of the current deviation (CD) from the centre of the traffic gap at the moment of its arrival at the intersection allow a functional interpretation of the velocity adjustments discussed in the previous section. As can be seen in Figure 5.2.6, the velocity adjustments observed under the different Offset and LV/TV Motion conditions systematically gave rise to a decrease in the current deviation over the course of the participants' approach to the intersection. The final result is of course reflected in the crossing position discussed earlier.

CD profiles were analyzed using a four-way repeated-measures ANOVA on the factors Offset, LV Motion, TV Motion, and Time. The results revealed main effects of the factors Offset ($F(2,28) = 443.5$, $p < .001$, $\eta^2 = .97$), LV Motion ($F(2,28) = 110.7$, $p < .001$, $\eta^2 = .89$), and Time ($F(4,56) = 9.1$, $p < .001$, $\eta^2 = .39$). Significant first-order interactions appeared for Offset \times Time ($F(8,112) = 344.0$, $p < .001$, $\eta^2 = .96$), LV Motion \times Time ($F(8,112) = 52.6$, $p < .001$, $\eta^2 = .79$), and TV Motion \times Time ($F(8,112) = 2.1$, $p < .05$, $\eta^2 = .13$). Finally, a significant second-order interaction appeared for Offset \times LV Motion \times Time ($F(16,224) = 5.2$, $p < .001$, $\eta^2 = .27$).

The Offset \times Time interaction, discussed above, can be clearly seen by comparing the temporal patterns across the three columns of Figures 5.2.6a and 5.2.6b (Late Offset – left column; No Offset – middle column; Early Offset – right column). Note the progressive reduction in CD commencing early on in both the Late and Early Offset conditions, indicating that the observed velocity adjustments were

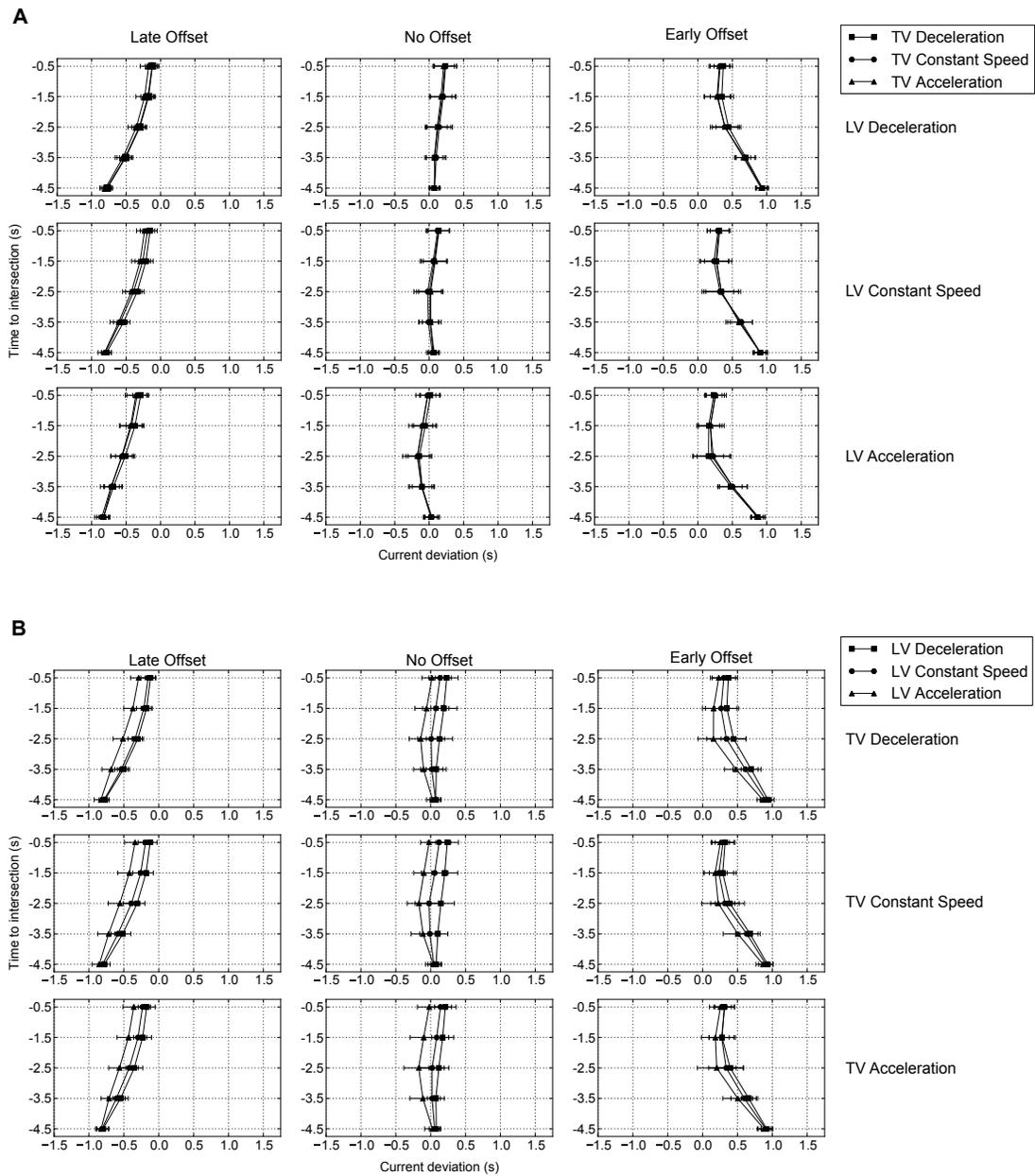


Figure 5.2.6: Current Deviation as a function of time before crossing the intersection for the three Offset conditions (columns). Panel A presents the LV Motion conditions on different lines and the TV Motion conditions with each subpanel by different symbols. Panel B presents the TV Motion conditions on different lines and the LV Motion conditions within each subpanel by different symbols.

indeed functional. The LV Motion \times Time and TV Motion \times Time interactions, also discussed above, can be seen by comparing across the three rows (Deceleration – upper row; Constant Speed – middle row; Acceleration – lower row) of Figures 6a (LV Motion) and 6b (TV Motion). The second-order interaction Offset \times LV Motion \times Time is due to the more pronounced effect of the Early Offset (as compared to the Late Offset) in the LV acceleration conditions (as compared to the LV deceleration conditions).

Realizing that Figures 5.2.6a and 5.2.6b are two different representations of the same data, their comparison brings out the statistical finding that the LV Motion characteristics ($\eta^2 = .79$) affect the participants' behaviour to a larger degree than the TV Motion characteristics ($\eta^2 = .13$). Indeed, Figure 5.2.6a reveals that CD profiles change qualitatively over LV Motion conditions (i.e., from row to row) while, within each panel, CD profiles over TV Motion conditions (represented by different symbols) largely overlap. Figure 5.2.6b reveals the opposite pattern, with effects of LV Motion characteristics (different symbols) observable within each panel, but no clear change in pattern over TV Motion conditions (i.e., from row to row).

Once again, these results revealed a clear asymmetrical role of both LV/TV motion characteristics in gradual adjustments of approach speed. However, the consistent tendency to null over time the current deviation (relative to the gap's centre) irrespective of the LV/TV motion characteristics is a strong support in favour of a global level based control of approach. We examine this hypothesis more in detail in the next section.

Global level analyses

The linear-model special-purpose ANOVA on crossing position revealed that the C1 (Gap Size Changes) and C2 (Gap Speed Changes) hypotheses explained a significant amount of variance: Crossing position was affected by Gap Size Changes ($F(1,382) = 10.1, p < .01$) and by Gap Speed Changes ($F(1,382) = 24.54, p < .001$). As expected, residual contrasts did not explain a significant amount of variance (F 's $< 1, ns$). Moreover, as can be seen in Figure 5.2.7, the C1 hypotheses were corroborated: Participants crossed the intersection closer to LV when the traffic gap size was expanding than when it was contracting, and this effect was more pronounced in the “both sides” than in the “one side” conditions. While the C2 hypotheses explained a significant part of the variance, the effects observed were opposite to those predicted: Participants passed further from LV when the traffic gap was accelerating than when it was decelerating and this effect was more pronounced in the “both sides” than in the “one side” conditions.

These analyses demonstrated that gap's size (or gap's centre acceleration) had a significant effect of gap crossing location irrespective of the gap's centre acceleration (gap's size respectively) and of the vehicle which contribute to these changes in velocity (in size). These results support the hypothesis of a global gap-related control of intersection crossing. The fact that gap's size and gap's centre acceleration effects were more pronounced when both vehicles contributed to the gap's dynamic give even further support to this hypothesis: Indeed, these effect cannot be explained a by-product of the averaged weak trail vehicle effect with strong lead vehicle effect on gap crossing location (cf., velocity profile analyses in local level section).

Discussion

Safely crossing an intersection requires drivers to enter and clear the intersection within the (space-time) interval formed by the lead and trail vehicles of a gap of appropriate size in the train of incoming traffic. We studied drivers' speed regulation patterns as they approached a perpendicular intersection with

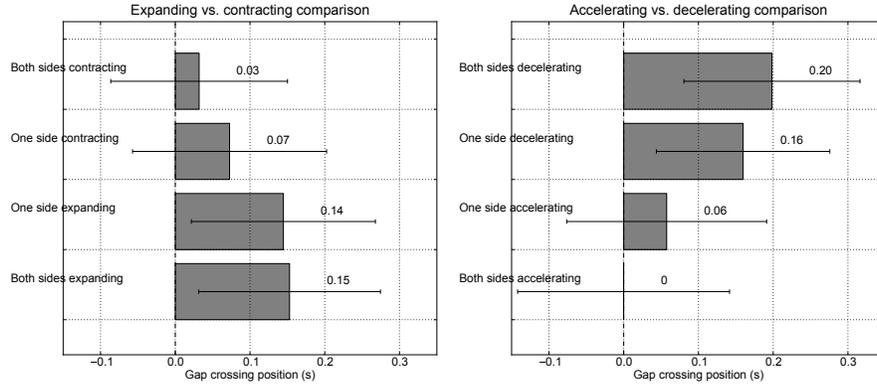


Figure 5.2.7: Gap crossing position as a function of global changes in gap size (left) and gap speed (right) brought about by LV/TV motion affecting only one or both sides of the gap simultaneously.

the goal of safely passing through a traffic gap. We first discuss the velocity adjustments observed in relation to the initial situation with which participants were confronted (i.e., the Offsets) before turning our attention to the role of lead and trail vehicles. Finally, we address the perceptuo-motor strategies that may underlie the observed behaviour.

Initial offset

Replicating the findings of [Louveton *et al.* \(2012a\)](#) for car drivers and [Chihak *et al.* \(2010\)](#) for cyclists, the present experiment demonstrated that participants regulated their velocity from the very early stages of the approach to the intersection onwards. In the current experimental setting the traffic gap always had the same size (2.23 s; 35 m) at the moment it crossed the participant's trajectory. Driving at a stabilized speed, participants started a trial at different distances from the intersection, leading to initial offsets of -1 s (-15 m), 0 s (0 m), or +1 s (+15 m) with respect to the geometrical centre of the traffic gap at the moment of crossing the intersection. Note that in both the Late Offset and Early Offset conditions maintaining the initial velocity would still give rise to arriving at the intersection within the traffic gap, albeit fairly close to the trail or lead vehicles, respectively. Nevertheless, in the Late Offset conditions participants progressively increased their velocity. In the Early Offset conditions participants first progressively decelerated before re-accelerating in the last moments before crossing the intersection. In the No Offset conditions, participants maintained their initial velocity over the first part of the approach before accelerating in the vicinity of the intersection. Under all conditions, velocity adjustments were smooth and progressive. Analyses of the time-series of the current deviation from the centre of the traffic gap revealed that the observed velocity adjustments were functional, as they resulted in a gradual convergence of current deviation towards the centre of the traffic gap. Interestingly, although systematically initiated early on during approach to the intersection, the adjustments observed did not fully compensate for the initial offsets (see [Chihak *et al.*, 2010](#); [Louveton *et al.*, 2012a](#), for similar results). Finally, the drivers' propensity to accelerate in the final part of the approach resulted in crossing the intersection slightly ahead of the geometric centre of the traffic gap. Whatever the reasons underlying this last-minute acceleration, it is clear that it contributes to safely crossing the intersection, as the time spent on the intersection is minimized.

Global and local aspects of the traffic gap

Drawing inspiration from the work on intercepting moving objects, both [Chihak *et al.* \(2010\)](#) and [Louveton *et al.* \(2012a\)](#) explicitly described the intersection-crossing task as one of intercepting a moving gap (also see [Watson *et al.*, 2011](#)). However, before embracing this analogy —and proceeding with its logical consequences such as seeking to identify the underlying perceptuo-motor strategy— the present experiment addressed the ontological issue whether a gap may indeed be considered as an entity. By factorially varying the LV and TV motion characteristics, we set the stage for independent evaluations of the influences on approach behaviour of global gap characteristics and local gap boundary characteristics.

Gap characteristics were affected by combined LV and TV motion conditions (cf., [Table 5.2.3](#)) at the global level in terms of size (gap expanding, remaining constant, or contracting) and speed (gap accelerating, moving at constant speed, or decelerating). As demonstrated by the contrasts of the special-purpose ANOVA on gap crossing position, changes in both gap size and gap speed affected the drivers' behaviour in a systematic manner. When the gap expanded during approach, drivers passed the intersection closer to the LV than when the gap contracted. Evidence in favour of an effect of the global change in gap size comes from the observation that, while this effect was already present when the motion characteristics of either the LV or the TV created the change in gap size, it was stronger when both LV and TV motion characteristics contributed to the change. A similar pattern of result was obtained with respect to the effects of gap speed: When the gap accelerated during approach, drivers passed the intersection further from the LV than when it was decelerating. Again, while this effect was already present when the motion characteristics of either the LV or the TV created the change in gap speed, it was stronger when both LV and TV motion characteristics contributed to the change. Furthermore, the weak role played by TV motion characteristics taken together with the tendency of zeroing-out current deviation over time (whatever LV/TV motion characteristics) these results weight the hypothesis of an additive effect of both LV and TV (i.e., the gap would not be perceived as an entity but each vehicles would have simultaneous effect on drivers' behaviour). We therefore conclude that the drivers' behaviour was affected by global variations at the level of gap size and gap speed. This strongly suggests that the gap is treated as an entity.

Note that the observation that drivers passed the gap closer to the LV when the gap was expanding than when it was contracting fits with the findings of [Louveton *et al.* \(2012a\)](#). Comparing behaviour for two different (constant) gap sizes, drivers were found to pass the gap closer to the LV for the larger gaps. This behaviour seems to rely more on a safety principle aiming at maximizing the margin of safety (toward the Trail Vehicle that “close” the inter-vehicular gap) rather than on a perceptual-motor strategy based on sustained optical size of the gap. Indeed, if participants had assumed a constant gap's size along the trial unfolding they would have be influenced by the perceived under/over-expanding gap's size (expanding vs. contracting gap respectively) contrasting with their assumption. In that case, they would have slowed-down their vehicle in gap expanding condition and conversely, they would have increased their speed in gap contracting condition due to a bias in Time-To-Contact estimation ([Rushton et Wann, 1999](#)). However, it is not clear neither that participants would have made such an assumption of a constant gap size along trial unfolding. The observation that drivers passed the gap further from the LV when the gap was accelerating than when it was decelerating was contrary to our initial hypothesis based on [Dewing *et al.* \(1993\)](#) finding that the probability to initiate a left-turn manoeuvre at an intersection increases with the speed of incoming vehicles. However, the results fit the hypothesis if drivers were to rely on instantaneous speed rather than on speed changes ([Benguigui](#)

et al., 2003), because within the framework of the experimental design of the present experiment an accelerating gap implied lower initial speed.

The influence of global variations in gap behaviour was also attested to by the similarity of effects provoked by the motion conditions of the individual LV and TV with respect to evolution over time of both velocity and current deviation. At the same time, these latter analyses systematically revealed a stronger influence of LV as compared to TV on the drivers' behaviour during approach to the intersection. This asymmetric effect, most clearly seen in Figure 5.2.6, suggests that drivers' behaviour is not only affected by the global characteristics of the gap but also by the local characteristics of the individual gap boundaries.

Implications for underlying perceptuo-motor strategies

The functional regulations of approach velocity discussed above are indicative of the operation of a perception-action coupling type of control (e.g., Peper *et al.*, 1994; Chardenon *et al.*, 2005; Montagne *et al.*, 1999, 2003). Continuously adapting behaviour on the basis of perceptual information allows homing-in on the spatiotemporal requirements of the final goal, in this case that of crossing the intersection near the middle of the traffic gap. In this section we discuss the implications of our findings for the perceptuo-motor strategies that underlie the emergence of the behavioural patterns observed.

Distinguishing the global (gap-related) and local (boundary-related) levels of analysis, the present experiment was designed to address the question whether intersection crossing is based on intercepting a moving gap in the train of traffic or whether it is based on avoiding collision with the individual vehicles constituting the traffic train. Given the results described above indicating influences of global gap characteristics as well as local boundary characteristics, the answer to this question would seem to be: both! Considering the task as one of intercepting a moving gap allows a deeper exploration of the analogy (Chihak *et al.*, 2010; Louveton *et al.*, 2012a) with speed regulations in the task of intercepting a moving object that have been demonstrated to rely on (changes in) object bearing angle (Bastin *et al.*, 2006a,b, 2008; Chardenon *et al.*, 2002, 2004, 2005; François *et al.*, 2011; Lenoir *et al.*, 1999, 2002).

The participants' behaviour observed in the present experiment during the early phases of the approach is indeed compatible with a strategy of zeroing-out changes in bearing angle (i.e., Constant Bearing Angle or CBA strategy), with the latter taken to refer to a point in the vicinity of the geometrical centre of the traffic gap. In the Late offset conditions the initial decrease in bearing angle is compatible with the observed increase in speed. In the Early Offset conditions the initial increase in bearing angle is compatible with the observed decrease in speed. Finally, in the No Offset conditions the initial constancy of the bearing angle is also compatible with the observed preservation of speed. Note that the effect of intersection geometry reported by Louveton *et al.* (2012a) is also compatible with the operation of a CBA- strategy.

The final acceleration observed (here as well as in Louveton *et al.*, 2012a) under all three offset conditions is not, however, what one would expect on the basis of a CBA strategy (Chihak *et al.*, 2010). Such last-minute accelerations might be understood as resulting from the rising influence of the risk of colliding with TV, once the risk of colliding with LV has faded away. In combination, the final-acceleration effect and the stronger influence of LV than TV on speed regulations during approach to the intersection therefore point in the direction of a strategy of collision-avoidance that should at least partially be based on optical expansion of LV and TV (Caird *et al.*, 1994; Hancock *et al.*, 1991 see Rushton *et al.*, 1999; Bastin *et al.*, 2008 for similar conclusions with interceptive tasks).

Together, the pattern of results may thus be taken to suggest a switch during approach to the intersection from an interceptive strategy (aiming for a position in the vicinity of the centre of the traffic gap, based on a CBA-type strategy) to a collision-avoidance strategy (aiming to arrive after the LV but before the TV). While such an explanation poses the problem of the mechanism underlying the hypothesized switch in strategy, we would like to insist on its coherence with the overall pattern of results reported here and in [Louveton *et al.* \(2012a\)](#). An alternative and admittedly much simpler strategy^a would at first glance also seem to explain the results obtained: in this strategy drivers would aim to pass at a safe distance or time behind the LV and once it has become clear that collision with the LV is no longer a threat they would accelerate in the final stages to minimize the amount of time in the collision zone. However, the overall pattern of results indicates that this is not what drivers do. While in the present study the final gap was of equal size under all conditions, [Louveton *et al.* \(2012a\)](#) evaluated the effects of (final) gap size. As it does not take into account the size of the gap because the TV is not taken into consideration, the alternative strategy would predict that drivers pass at the same safe distance or time behind the LV for all traffic gap sizes. The results of [Louveton *et al.* \(2012a\)](#) contradict this prediction: drivers pass further away from the LV when confronted with a larger gap. Second, the global analysis allowed by the particular combinations of the motion characteristics of LV and TV of the present study (see [Table 5.2.2](#)) revealed gap-size and gap-speed related effects that cannot be explained by the alternative strategy. Finally, while LV had a stronger influence on drivers' behaviour than TV, the latter nevertheless exerted a systematic influence on approach speed regulations (as revealed by the recurrent main effects and interactions for all variables analysed). Overall, the differential contributions of lead and trail vehicles to intersection crossing behaviour much resembles the differential contributions of inner and outer edge lines in curve driving [Coutton-Jean *et al.* \(2009\)](#). In both cases, one constituent exerts a (much) stronger influence than the other, but both nevertheless play a role.

Finally, a parsimonious solution may exist to the above-noted problem associated with a switch in strategy. The recent work of [Fajen *et al.* \(2003, 2007\)](#) indeed suggests the concurrent operation of goal attractor dynamics (driving the system toward a constant gap- centre bearing angle) and obstacle avoidance dynamics (driving the system away from constant bearing angles of the lead and trail vehicles). As the influence of obstacles is conceived as decreasing with distance, the obstacle-avoidance dynamics will only show up in the final stages of the approach to the intersection. Obviously, the existing data are not sufficient to allow us to decide between these alternatives. Yet, developing the latter theoretical framework could provide an experimentally-testable foundation for [Gibson *et al.* \(1938\)](#) appealing concept of the "Field of Safe Travel".

^aWe thank an anonymous reviewer for bringing this possibility to our attention.

Chapitre 6

Mise à l'épreuve d'une stratégie de (dé-)synchronisation fondée exclusivement sur l'angle de relèvement

6.1 Synthèse

Dans l'étude précédente nous avons commencé à envisager des pistes concernant les invariants qui pourraient être utilisées dans une situation de traversée d'intersection à l'intérieur d'un créneau libre du trafic. Nous avons confirmé l'importance du contrôle continu dans la réalisation des tâches de traversée d'intersection. Par ailleurs, les résultats obtenus nous ont conduits à envisager la mise en œuvre complémentaire d'une stratégie d'interception de la fenêtre inter-véhiculaire (contributions perceptives globales) et d'une stratégie d'évitement de collision orientée vers les véhicules du trafic qui bornent cette fenêtre (contributions perceptives locales). Ainsi, nous proposons que la tâche de traversée d'intersection nécessite pour le conducteur à la fois de synchroniser son déplacement avec celui de la fenêtre inter-véhiculaire et de dé-synchroniser son déplacement avec celui des véhicules du trafic.

L'utilisation du taux de changement de l'angle de relèvement (i.e., l'angle qui sépare la direction du déplacement du sujet et la position d'une cible) nous semble être un très bon candidat pour expliquer ces deux aspects du comportement de traversée d'intersection (dé-/synchronisation). En effet, concernant la stratégie de synchronisation (i.e., l'interception de la fenêtre envisagée comme une cible), les participants pourraient mettre en œuvre une stratégie CBA (cf., Section 2.3.2) référée à un point critique de la fenêtre inter-véhiculaire (e.g., son centre géométrique). Cette stratégie a été démontrée comme très pertinente dans le cadre de l'interception de cibles plus petites (Lenoir *et al.*, 1999; Bastin *et al.*, 2010, 2006a, 2008; Chardenon *et al.*, 2004, 2005, 2002; François *et al.*, 2011; Lenoir *et al.*, 2002). En parallèle, la stratégie de dé-synchronisation (i.e., l'évitement de collision) pourrait mettre en jeu le taux de changement de l'angle de relèvement dans le cadre d'une stratégie CBA "inversée". Cette stratégie consisterait à laisser l'angle de relèvement dériver au cours du temps (comme le font les marins, Le Brun *et al.*, 2007). Au final,

l’opposition continue synchronisation/dé-synchronisation fondée sur l’utilisation d’une même stratégie, la stratégie CBA, pourrait être une hypothèse très parcimonieuse pour expliquer le comportement des conducteurs.

Cependant, il n’est pas certain que l’angle de relèvement soit le seul invariant utilisée, notamment quand le conducteur doit dé-synchroniser son déplacement de celui de véhicules du trafic. En effet, il a été montré que même dans les tâches d’interception de cibles, les participants utilisaient le taux de changement de la taille optique de celle-ci (Bastin *et al.*, 2008). En effet, la taille optique et son taux de changement (i.e., l’expansion optique) permettent d’avoir accès au Temps de pré-Contact (TTC) avec la cible en approche. Dans ce cadre, Lee (1976) a démontré que la perception du TTC était spécifié par l’inverse de τ^a (voir aussi le τ généralisé de Bootsma et Craig, 2002). Par ailleurs, les études antérieures sur la traversée d’intersection ont montré que les jugements perceptifs des participants étaient impactés par la taille optique des véhicules du trafic (Hancock *et al.*, 1991; Dewing *et al.*, 1993; Caird et Hancock, 1994). En particulier, il a été démontré que pour des contraintes temporelles identiques, les participants étaient moins enclins à réaliser une manœuvre de traversée (ou le cas échéant estimaient le temps disponible plus faible) face à l’approche d’un “grand” véhicule (i.e., un camion) que face à un à l’approche d’un “petit” véhicule (i.e., une mobylette) au niveau de l’interception. Un tel biais de perception du TTC a également été démontré dans le cadre d’études plus théoriques sur le moment de déclenchement de l’action face à l’approche d’une cible (DeLucia, 1991; DeLucia et Warren, 1994; Heuer, 1993; van der Kamp *et al.*, 1997; Michaels *et al.*, 2001). Ces résultats mettent l’accent sur le rôle de la taille optique et de son taux de changement (l’expansion optique) dans le cadre d’une activité de perception du TTC. Ainsi, ces résultats suggèrent que le comportement des participants est guidé par un principe de sécurité fondé sur la perception de l’arrivée imminente d’un obstacle (de Rugy *et al.*, 2001; Rushton et Wann, 1999).

Ainsi, dans cette expérience notre objectif est de tester l’hypothèse de l’utilisation exclusive du taux de changement de l’angle de relèvement comme paramètre régulateur du comportement. Pour cela, nous avons testé le rôle de la taille optique (et de l’expansion optique) des véhicules du trafic sur la régulation de la vitesse d’approche. L’utilisation de la taille optique des véhicules du trafic viendrait pondérer l’hypothèse de la mise en œuvre d’une stratégie d’évitement de collision fondée exclusivement sur le taux de changement de l’angle de relèvement. Pour atteindre cet objectif, nous avons manipulé trois facteurs expérimentaux : le facteur “Offset” (-10, 0, +10 mètres, cf. Chapitre 5), la géométrie de l’intersection (angle ouvert, fermé, perpendiculaire, cf. Chapitre 4) et enfin la taille des véhicules du trafic. Cette dernière pouvant être normale, grande (taille multipliée par 2) ou petite (taille multipliée par 0.5). De plus, la taille ainsi manipulée pouvait être soit constante tout au long de l’essai (condition de tailles statiques), soit partir d’un état manipulé (grande ou petite) et devenir progressivement normale jusqu’à l’instant de franchissement au bout de 5.5 secondes (condition de tailles dynamiques). Dans tous les cas, les contraintes spatiales et temporelles au moment de la traversée sont identiques (fenêtre de 26.55 mètres se déplaçant à une vitesse de 15 m/s).

Nos résultats confirment une fois encore la nature progressive des adaptations effectuées par les participants au cours du temps, notamment vis-à-vis des contraintes associées au facteur “Offset”. Nos résultats montrent également que la taille des véhicules impacte significativement l’ajustement de la vitesse de déplacement. En condition de tailles statiques, les participants ralentissent significativement (et traversent plus loin du véhicule lièvre) à l’approche d’un “grand” véhicule par rapport aux situations de

^a $\tau = \theta/\dot{\theta}$ et $TTC \approx 1/\tau$ avec θ la taille optique de la cible et $\dot{\theta}$ son expansion optique.

tailles normale et “petite”. En revanche, en condition de tailles dynamiques, les participants ralentissent significativement (et traversent plus loin du véhicule lièvre) à l’approche d’un véhicule de “petite” taille (mais dont la taille augmente progressivement) par comparaison aux situations de taille normale et “grande” (mais dont la taille diminue progressivement). Par ailleurs, l’impact de la taille optique sur le comportement des participants est plus prononcé en situation de géométrie en angle fermé. Globalement, ces résultats réfutent l’hypothèse de l’utilisation exclusive du taux de changement de l’angle de relèvement pour éviter une collision avec les véhicules du trafic. Ils mettent au contraire particulièrement l’accent sur la pertinence de l’expansion optique comme variable régulatrice de la vitesse de déplacement. En effet, l’expansion optique est plus forte dans les conditions de grande taille statique et dans celle de petite-vers-grande taille dynamique. Pour finir, l’arrivée en angle fermé accentue l’effet de ces deux dernières conditions sur l’expansion optique.

Cette expérimentation permet de pondérer notre hypothèse initiale. Bien que l’utilisation d’une même stratégie fondée sur la même information visuelle aurait permis une explication élégante du comportement de traversée d’intersection, les résultats de cette expérience et ceux obtenus auparavant mettent l’accent sur l’utilisation potentielle de différents invariants pour réaliser cette tâche. La façon avec laquelle ces différents invariants (taux de changement de l’angle de relèvement et expansion optique) sont utilisés reste encore peu claire : en effet, ils pourraient soit donner différentes informations utilisées conjointement en vertu d’un mécanisme d’intégration qui reste à déterminer, soit donner une information “composite” (combinant différents aspects de la situation) et qui serait utilisée dans le cadre d’une seule stratégie (Jacobs et Michaels, 2006; Bootsma et Craig, 2002).

6.2 Manuscrit de l’étude

Introduction

Human perceptual system provides efficient mechanisms to allow a safe interaction with the environment, acting in respect to various spatial and temporal constraints. In some situations, like driving at intersection, coping with such constraints in a very accurate and fast-paced way is critical to avoid injuries. For example, in a road crossing task, drivers have to cross intersection through an appropriate inter-vehicular gap of oncoming traffic flow. In this situation, perceptual-motor behaviour appeared to be controlled by perceptual variables that are easy to pick-up and that allow a safe and continuous control of the vehicle’s displacement (Chihak *et al.*, 2010; Louveton *et al.*, 2012a).

However, Chihak *et al.* (2010) and Louveton *et al.* (2012a) were not able to disambiguate which optical variables participants used in order to control their approach speed. To help clarifying this question, Louveton *et al.* (2012b) designed an experiment aiming at assessing the specific effect of the different moving traffic train properties on approach speed. Results demonstrated that participants’ speed regulations were controlled at two levels. On the one hand speed regulations were affected by global, gap-related, properties such as the size of the inter-vehicular gap and the motion characteristics of its centre. On the other hand they were affected by local, boundaries-related, properties such as motion characteristics of the lead and trail vehicles. The fact that participants’ behaviour was tuned toward both gap- and boundaries-related properties lead authors to the assumption that participants may have used two complementary types of information. Indeed, participants’ speed regulations may have been controlled both by information about the interception of the free moving gap (gap-related properties) and information about the avoidance of oncoming traffic vehicles (boundaries-related properties).

In these regards, the bearing angle (i.e., the angular distance between an observer’s heading and the position of a target) appears to be a good candidate to answer the question of the optical variable that could have been used by participants. Indeed, a constant value of bearing angle (i.e., a null derivative) specifies a complete synchronization of actor’s displacement with which of the target (i.e., specifies a collision with or an interception of the target depending on the task). Thus, this optical variable could account for both interception and collision avoidance behaviour: In the former case by using a Constant Bearing Angle strategy (CBA) that implies to zero-out changes in bearing angle in order to ensure an interception of the target; and in the latter case by using a reverted CBA strategy that implies to let drifting the bearing angle to ensure a non-interception of the target.

If we consider the necessity for drivers to intercept a free moving traffic gap, we can make the assumption that intercepting an horizontally moving gap is very similar with intercepting an horizontally moving target. The difference between the two tasks would only lie on the spatial and temporal size of the task realization window: intercepting a ball requires to act into a small task realization window (centimetres) while intercepting a traffic gap requires to act into a larger one (meters). In this context, it was demonstrated that the rate of change of a target’s bearing angle is a reliable information in order to control approach speed along an interception task (Lenoir *et al.*, 1999). Moreover, numerous studies demonstrated that CBA strategy accounts well for behavioural data (Bastin *et al.*, 2010, 2006a, 2008; Chardenon *et al.*, 2004, 2005, 2002; François *et al.*, 2011; Lenoir *et al.*, 2002). However, it is also required to drivers to avoid collision with traffic vehicles. In this respect, using a reverted CBA strategy in order to avoid a collision is known for years by sailors (see Le Brun *et al.* 2007, for an illustration in the context of maritime navigation).

Globally, our task requires drivers to synchronize (say to intercept) and/or to de-synchronize (say to avoid intercepting) their displacement with the different elements of the oncoming traffic train (the free inter-vehicular gap and the boundaries vehicles). This fact taken together with behavioural patterns observed in previous experiments (Louveton *et al.*, 2012a, 2012b) appears to fit well with the use of a CBA-like strategy. However, there is no evidence on the exclusive use of the bearing angle as a control parameter in this type of tasks. Thus, in this study we focus on the potential use of additional optical variables that could be involved along with the bearing angle.

More precisely, in a target interception task Bastin *et al.* (2008) demonstrated that manipulated target’s optical expansion (i.e., rate of change of optical size) influenced significantly participants’ approach speed during the task unfolding. A similar pattern of results was found by de Rugy *et al.* (2001) in a locomotor pointing task. In both these studies (Bastin *et al.*, 2008; de Rugy *et al.*, 2001), it was observed that participants were more likely to decrease their approach speed when target’s optical size was (experimentally manipulated) over-expanding than in normal and under-expansion conditions. Compatible patterns of results were observed in the more general context of action triggering in response to an approaching object. In several studies, authors found that judged Time-To-Contact (TTC) is shorter with large sized ball than with small sized ones (DeLucia, 1991; DeLucia et Warren, 1994; Heuer, 1993) and that participants initiate intercepting movement earlier with large sized ball than with small sized ones (van der Kamp *et al.*, 1997; Michaels *et al.*, 2001).

Finally, the role of optical size was also acknowledged in road crossing tasks at intersection. In these studies participants were stopped at an intersection and had to make TTC estimations with an oncoming traffic vehicle. Hancock *et al.* (1991) evidenced that participants were less likely to initiate a left-turn manoeuvre when the oncoming vehicle was large (for example a truck) than when it was small

(a motorcycle). Another study also demonstrated (Caird et Hancock, 1994) that drivers are more likely to take small safety margins (that is they were more likely to estimate a small time before oncoming vehicle arrival) with smaller vehicles than with larger ones. They identified this behavioural pattern as the Size Arrival Effect (SAE), which would be accounted by a biased TTC estimation due to the actual size of oncoming vehicle. This account is particularly plausible as it was demonstrated that TTC information could be accessed through the optical size and optical expansion of an approaching object (Lee, 1976, see also Bootsma et Craig, 2002 for a generalized relation between optical expansion and TTC). Overall, these results evidenced that participants behaviour is characterized by a safety principle tuned toward an optical variable that indicated the imminence of contact with an approaching object (Rushton et Wann, 1999).

In the present study, we aim at assessing the role of optical-size based variables (i.e., optical size and optical expansion) of approaching traffic vehicles at an intersection. We used the same experimental protocol as in Louveton and colleagues (Louveton et al., 2012a, 2012b), in which participants had to cross an intersection inside an horizontally moving inter-vehicular gap. This time, we manipulated both the actual size of oncoming vehicles (normally sized, small or large), and the way these manipulated size changed during the approach of the intersection: the size could either remain the same all over the trial (static size condition) or change from large/small size to reach gradually a normal one when the participant crosses the intersection (dynamic size). The former condition produced a “normal” expansion pattern along the participant’s approach (although different as a function of vehicles’ size), while the latter condition produced either an over- (small-to-normal size) or under-expansion (large-to-normal size) pattern. Additionally, we manipulated the intersection geometry which has an impact on optical size perception: oncoming vehicles could come from a perpendicular, a closed or an opened-angle intersection.

As a CBA-like strategy will not be affected by manipulations of optical size or by those of optical expansion, this work allows us to test the assumption of an exclusive use of a CBA-like strategy (either for interception or avoidance). If participants’ behaviour is affected by optical size manipulations, that would on the one hand provide further support for the hypothesis of an optical-size based control of approach speed. On the other hand, that would dismiss the hypothesis of an exclusive use of a bearing-angle based control.

Methodology

Participants

Twelve participants (24.7 ± 2.9 years old; $m \pm sd$) with normal or corrected to normal vision volunteered for participation in the experiment. They all held a driver’s license for at least three years, with an average duration of 6.8 ± 2.7 years.

Apparatus and visual environment

Participants drove a fixed-base SIM2 driving simulator (cf., Figure 6.2.1, left panel) equipped with a car seat, a steering wheel, and a set of accelerator and brake pedals. The drivers’ visual environment was generated using the ARCHISIM (2011 release) software package (Espie et Auberlet, 2007). Using three PLUS projectors operating at 60 Hz, the visual scene was presented on three planar screens with the left and right screens oriented inward so as to sustain a total horizontal visual angle of 150° for a vertical

visual angle of 40° . Participants drove on a conventional two-lane 7-m wide textured road through a flat rural environment (see Figure 1, right panel). The driving simulator implemented an automatic transmission so that participants did not have to shift gears. The participant's car was 3.45 m long and 1.55 m wide, with the viewpoint located 1.15 m from the ground.



Figure 6.2.1: Simulator and simulated environment: controllers and screens (left panel); road crossing task with the two light vehicles defining the inter-vehicular Gap (right panel).

Task and procedure

In order to familiarize the participants with the simulator, they first performed a following task, consisting of attempting to remain at a constant distance (of two central line segments) behind a car moving in front. The latter changed speed regularly, moving at 50, 60 or 70 km/h during 4, 6, or 8 second periods. Speed levels and durations were randomly combined into a sequence of eight min. Accelerating, decelerating, and maintaining velocity during this following task allowed the participant to discover the action capabilities of the simulated vehicle driven. Following this familiarization phase and a short break, the experimental phase was started. During the experimental phase the participants' task was to safely cross an intersection formed by two perpendicular straight roads. During the approach to the intersection the participant was confronted with a four-vehicle traffic train coming from the left. This traffic train consisted of a truck, two vehicles and another truck (see Figure 6.2.1, right panel). Participants were to cross the intersection using the gap between the two vehicles (i.e., the traffic gap). In the absence of any horizontal or vertical traffic signs, no information with respect to priority was provided.

The four-vehicle traffic train always moved in such a way that the centre of the traffic gap (between the two vehicles as measured by the distance between the lead vehicle's rear bumper and the trail vehicle's front bumper) arrived at the middle of driver's lane 5.5 s after the beginning of the intersection scenario. The spatial window available for passing the intersection was 26.55 m, corresponding to a temporal window of 1.77 s as the traffic train's travel speed is 15 m/s. Three aspects of the situation were experimentally manipulated: the geometry of the intersection, the initial position of the driver and the size of the two oncoming vehicles. Varying the intersection angle between the two roads (60° , 90° , or 120°) affected intersection geometry. From the participant's point of view (Figure 6.2.2), the three different intersection geometries gave rise to opened-angle, perpendicular-angle, or closed-angle intersections.

The second factor manipulated was the participant's initial distance from the intersection, so as to create an offset between the anticipated moment of arrival at the intersection of the participant and the moment of arrival of the centre of the traffic gap. To this end, the participant's distance from the intersection was set to 104, 88, or 72 m at the onset of the intersection-crossing scenario. This occurred once the participant had stabilized the car's velocity (see below). If the participant would continue at

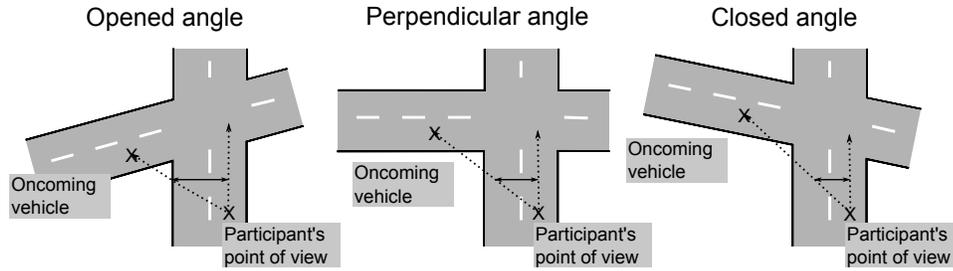


Figure 6.2.2: The three different intersection geometries used give rise to three different angle of approach conditions. The traffic vehicles move from the left to right and participants from bottom to top. The arrows indicate the angular distance between the participant's trajectory and an oncoming object. For equivalent distances to the intersection this angle is large in the opened-angle condition, small in the closed angle condition and intermediate in the perpendicular-angle condition.

the stabilized velocity (16 m/s = 57.6 km/h), s/he would arrive at the intersection with a temporal offset of -1 s (Late Offset), 0 s (No Offset), or +1 s (Early Offset) with respect to the centre of the traffic gap (corresponding to a spatial offset of -15 m, 0 m, or +15 m, respectively). Thus, in the No Offset condition participants did not need to change their velocity to cross the intersection safely. In contrast, in Late or Early Offset conditions they had to increase or decrease their velocity during the approach to the intersection in order to avoid (near) collision with the lead or trail vehicle, respectively, arriving at the intersection at distances of -13.3 m and +13.3 m from the traffic gap's centre (for a road crossing at 5.5 s).

The last factor manipulated was the two oncoming vehicles' size which could be (the same for both the two vehicles) normally (factor 1 or 3.45 m long), small (half the normal size, factor 0.5 or 1.725 m long) or large sized (twice the normal size, factor 2 or 6.9 m long). Moreover, vehicles' size could either not change during the trial unfolding (static sizes condition) or change gradually from small or large sizes at the beginning of the trial to a normalized size until the gap's centre cross the intersection (dynamic sizes condition). More precisely, small sized (respectively large sized) vehicles increase (decrease) linearly in size over the trial unfolding in a way that they will get normally sized when the gap's centre crosses the middle of driver's lane. In both cases (small-/large-to-normal sizes) vehicles' size continue to vary (respectively increase/decrease) afterwards.

Manipulating vehicles' size makes the inter-vehicular distance (from front- to rear-bumpers) varying as well. This by-product of size manipulations is handled differently in static and dynamic sizes conditions. In static sizes condition, small sized (respectively large sized) vehicles might have implied a larger (smaller) inter-vehicular distance if oncoming vehicles' position has been the same as with normal sized vehicles trials. In order to neutralize this by-product effect of size manipulations, position of small or large vehicles were respectively set nearer (28.275 m) or farther (33.45 m) to each other so as to maintain the same inter-vehicular gap's distance in each trials (26.55 m).

In dynamic sizes condition, gradual changes in vehicles' size induce gradual changes in inter-vehicular gap's distance (from front- to rear-bumpers). In the small-to-normal trials (respectively large-to-normal trials), the inter-vehicular gap's distance begins larger (smaller) than in normal sized vehicles trials and linearly decreases (increases) in size over the trial unfolding until it will get normalized when the gap's centre crosses the middle of driver's lane. In so doing, inter-vehicular gap's distance remains the same (26.55 m) in all trials at the middle gap crossing instant (i.e., at 5.5 s). In both cases (small-/large-to-

normal vehicles' sizes) inter-vehicular gap's distance continue to vary (respectively decreases/increases) afterwards.

At the beginning of each trial, participants found themselves parked (i.e., with zero velocity) in the middle of their lane, without any other vehicles in sight. They started the car's engine and operated the accelerator pedal in order to attain a required velocity indicated by a speed dial placed directly in front of them. Their current speed was indicated by the needle's orientation and the required speed by a red zone on the dial, without any numerical information being provided. Speed had to be stabilized within the indicated zone. An 80-m long stretch of empty road was available for the initial acceleration and subsequent stabilization of speed. If the participant's car speed remained within the delimited zone (corresponding to 16.0 ± 0.69 m/s = 57.6 ± 2.5 km/h) over the last 20 m of the 80-m stretch, the speed dial disappeared and the intersection scenario was started, with the four-vehicle traffic train appearing on the left. If not, the trial was restarted. In the (rare) case that the driver did not pass between the traffic vehicles (colliding with one of them or braking so as to let the full four-vehicle traffic train pass) a large red triangle was presented. The three static vehicles' sizes conditions were combined with the three intersection geometries, and the three driver's position offsets, while the two dynamic vehicles' size conditions were combined only with the three intersection geometries (always in null Offset condition). This resulted in an experimental block of $3 \times 3 \times 3 + 2 \times 3 = 33$ trials. Each participant performed five blocks of 33 trials for a total of 165 trials. The order of presentation of the 33 different conditions was randomized within each block.

Data analysis

Intersection crossing was analysed via the position of the participant within the traffic gap at the moment of crossing. Taking the (geometrical) centre of the gap as the reference, a negative crossing position indicated crossing after the centre of the gap (i.e., closer to the trail vehicle) while a positive crossing position indicated crossing before the centre of the gap (i.e., closer to the lead vehicles). In order to examine the nature of the velocity adjustments effected during the approach to the intersection, we analysed the time course of participant's velocity and its instantaneous effect on future passing position within the traffic gap, allowing a functional interpretation of the observed velocity adjustments. As in [Louveton *et al.* \(2012a\)](#) the latter was operationalized through the current deviation (CD) from the traffic gap centre, calculated as the spatial or temporal distance from the centre of the traffic gap at which the participant would pass the intersection if the current velocity were to remain constant. In the No Offset condition, continuing at the initial (stabilized) velocity would lead the participant to pass right in the centre of the traffic gap. Thus, at the start of a No Offset trial, the temporal (spatial) current deviation (CD) was equal to 0 s (0 m). In the Late Offset condition, continuing at the initial velocity would lead the participant to pass 1 s / 15 m behind the centre of the traffic gap. Thus, at the start of a Late Offset condition CD was -1 s (-15 m). In the Early Offset condition, continuing at the initial velocity would lead the participant to pass 1 s / 15 m in front of the centre of the traffic gap. Thus, at the start of an Early Offset trial CD was +1 s (+15 m). The time courses of velocity and temporal current deviation were analyzed in five time steps, by averaging each of these variables over five 1-s intervals synchronized with the final moment of passing the intersection (i.e., 5 to 4 s, 4 to 3 s, 3 to 2 s, 2 to 1 s, 1 to 0 s before the participant arrived at the intersection). Finally, static and dynamic vehicles' sizes conditions were analysed separately giving two statistical analysis plans: Three Sizes x Three Geometries x Three Offsets for static sizes analysis and Three Sizes x Three Geometries

for dynamic sizes analysis. Normally sized vehicles trials from static sizes sample were used as control trials in dynamic sizes analysis.

Results

Success rate

All participants attempted to cross the intersection inside the traffic gap on all trials. On 7 out of a total of 1980 trials a participant collided with the lead or the trail vehicles. These rare (0.35%) collision trials were excluded from the analyses.

Static sizes

Gap crossing position The position in the traffic gap at which participants crossed the intersection was on average slightly biased towards the lead vehicles, for a grand mean of 1.85 m (SD = 1.49 m). A three-way repeated measures ANOVA was realized on $Offset_3 \times Size_3 \times Geometry_3$ experimental design for the gap crossing location measure. Results showed a main effect of *Offset*: $F(2, 22) = 266.34$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .96$; *Geometry*: $F(2, 22) = 105.68$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .91$ and also an effect of interaction *Offset* \times *Geometry*: $F(4, 44) = 4.99$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .31$ and *Geometry* \times *Size*: $F(4, 44) = 9.19$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .46$.

Post-hoc Scheffé analyses of the *Offset* \times *Geometry* interaction demonstrated ($ps < .05$) that Offset affected gap crossing position under different Geometry conditions (see Figure 6.2.3, left panel). Overall, participants crossed the intersection closer to the lead vehicle in the Early Offset condition than in the No Offset condition, which in turn gave rise to a gap crossing closer to the lead vehicle than in the Late Offset condition. Gap crossing position was jointly affected by intersection Geometry: participants crossed the gap farther from the lead vehicle in the Closed-angle Geometry than in the Perpendicular one. Gap crossing behaviour differed between the Closed and the Perpendicular-angle Geometries in all Offset conditions, while it differed between the Perpendicular and the Opened-angle Geometries only in the No Offset condition. As revealed by the *Geometry* \times *Size* interaction (post-hoc Scheffé, $ps < .05$) manipulated Size influenced gap crossing position only in the Closed-angle Geometry and in the Small-sized vehicles condition compared to others conditions (see Figure 6.2.3, right panel): participants crossed further from the lead vehicle with the Large-sized vehicles and the Closed-angle Geometry than in any others conditions.

Velocity profiles A four-way repeated measures ANOVA was realized on $Offset_3 \times Geometry_3 \times Size_3 \times Time_5$ experimental design for velocity profiles. Results showed a main effect of *Offset*: $F(2, 22) = 823.87$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .99$; *Geometry*: $F(2, 22) = 68.482$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .86$; *Time*: $F(4, 44) = 39.449$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .78$; an effect of second order interaction *Offset* \times *Geometry*: $F(4, 44) = 5.016$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .31$; *Size* \times *Geometry*: $F(4, 44) = 8.53$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .44$; *Offset* \times *Time*: $F(8, 88) = 505.63$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .98$; *Geometry* \times *Time*: $F(8, 88) = 41.839$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .79$ and effect of third order interaction *Offset* \times *Geometry* \times *Time*: $F(16, 176) = 10.185$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .48$; *Offset* \times *Size* \times *Time*: $F(16, 176) = 2.566$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .19$; *Size* \times *Geometry* \times *Time*: $F(16, 176) = 4.04$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .27$.

If participants were aiming for a position near the centre of the traffic gap, one would expect that they maintain their initial velocity in the No Offset conditions, accelerate in the Late Offset conditions

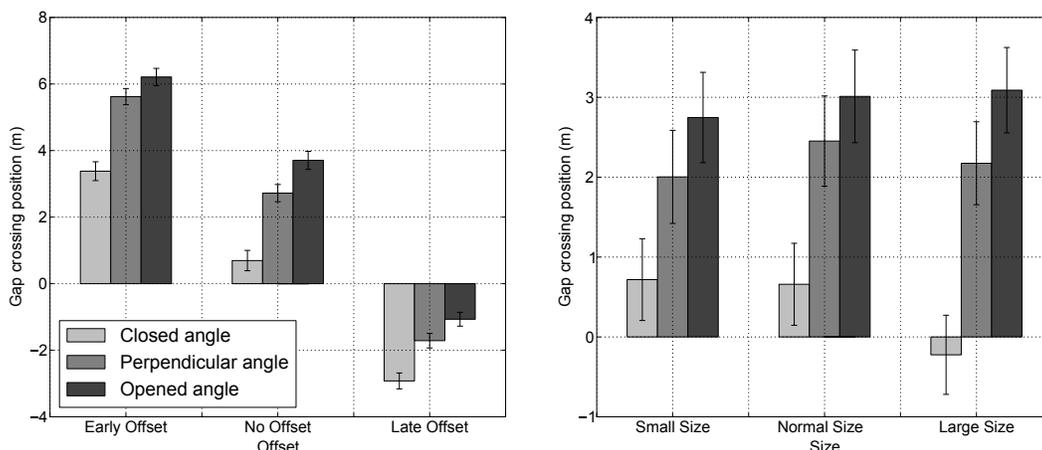


Figure 6.2.3: Gap crossing position for Offset x Geometry interaction (left) and for Geometry x Size interaction (right).

and decelerate in the Early Offset conditions. Corroborating the findings of [Louveton *et al.* \(2012a\)](#), the pattern of results (averaged over Size and Geometry conditions) obtained in the present study again corresponded qualitatively to these expectations, as revealed by the analysis of the Offset \times Time interaction (see Figure 6.2.4). In the No Offset conditions participants maintained their velocity over the first few seconds, before systematically accelerating in the last few seconds before reaching the intersection. This behavioural pattern underlies the observed positive bias in crossing position (cf., Figure 6.2.3, left panel). In the Late Offset conditions participants progressively accelerated, from the first beginning of the approach until the moment of crossing. In the Early Offset conditions participants began by decelerating during the early stages of the approach, followed by a re-acceleration in the vicinity of the intersection.

Consistently with gap crossing position results, *Size \times Geometry \times Time* interaction revealed (post-hoc Scheffé, $ps < .05$) that in the Closed-angle condition participants drove at a lower speed with the Large-sized vehicles than with the Normal and the Small-sized vehicles (see Figure 6.2.5). Indeed, confronted to the Large-sized vehicles, participants drove at a lower speed during the four last seconds in the Closed-angle condition than in the Perpendicular one. Moreover, there were no significant differences in velocity profiles between the Perpendicular and the Opened-angle Geometries for the Large-sized vehicles. In the same way, when they are confronted to the Normal-sized vehicles, participants drove at a lower speed during the three last seconds in the Closed-angle condition than in the Perpendicular one. No significant differences were found by comparing the Perpendicular and the Opened-angle Geometries. Finally, when participants were confronted to the Small-sized vehicles post-hoc analyses only revealed transitional differences (i.e., at the third second in the Closed vs Perpendicular-angle Geometries comparison and at the fifth in the Perpendicular vs Opened-angle Geometries comparison).

Current deviation profiles Continuously extrapolating the current state of affairs to the future moment of passing the intersection, the variations of the current deviation (CD) from the centre of the traffic gap at the moment of its arrival at the intersection allow a functional interpretation of the velocity

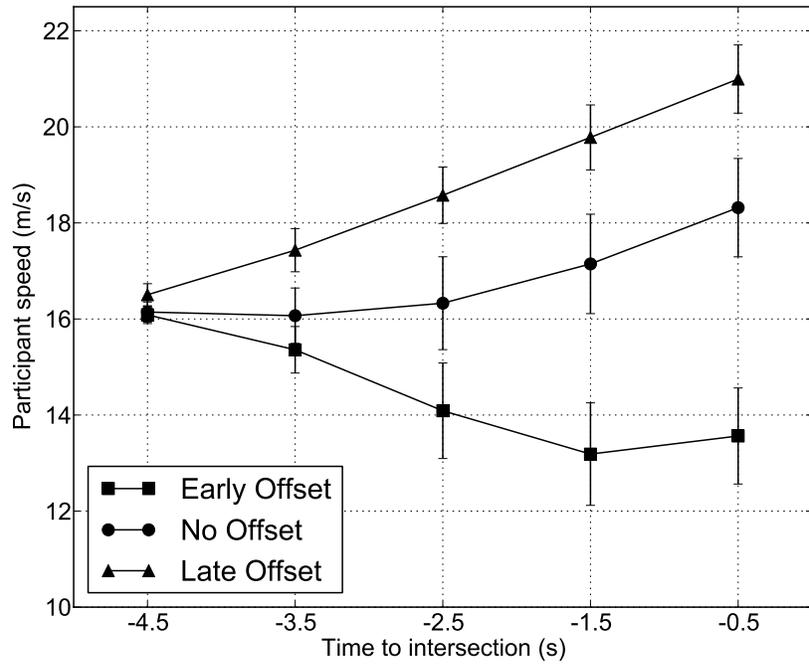


Figure 6.2.4: Overall participants' velocity profiles as a function of Offset conditions.

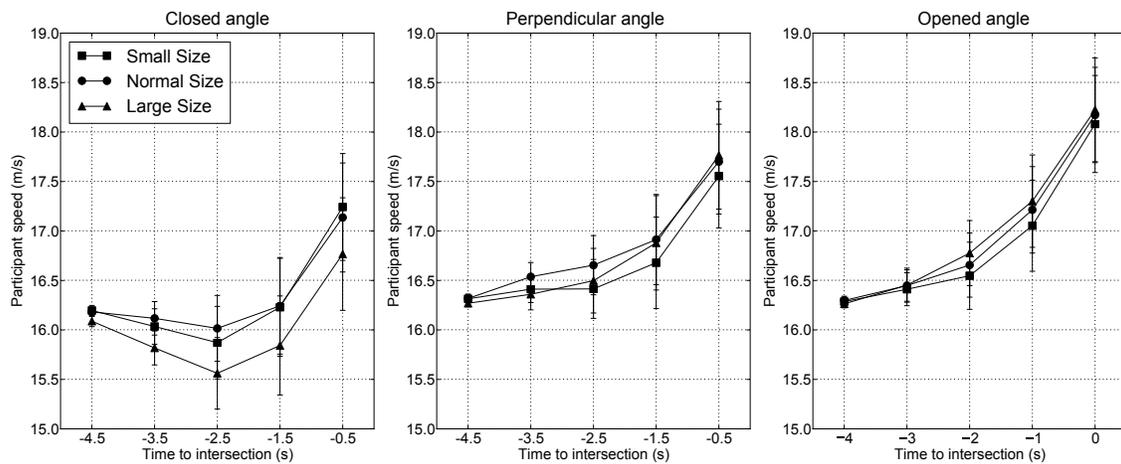


Figure 6.2.5: Velocity profiles for Size x Geometry x Time interaction.

adjustments discussed in the previous section. A four-way repeated measures ANOVA was realized on $Offset_3 \times Geometry_3 \times Size_3 \times Time_5$ experimental design for velocity profiles. Results show a main effect of *Offset*: $F(2, 22) = 958.24, p < .05, \eta^2_{partial} = .99$; *Geometry*: $F(2, 22) = 42.665, p < .05, \eta^2_{partial} = .80$; *Time*: $F(4, 44) = 9.089, p < .05, \eta^2_{partial} = .45$; an effect of second order interaction *Offset* \times *Geometry*: $F(4, 44) = 3.245, p < .05, \eta^2_{partial} = .23$; *Size* \times *Geometry*: $F(4, 44) = 5.889,$

$p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .35$; *Offset* \times *Time*: $F(8, 88) = 362.06$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .97$; *Geometry* \times *Time*: $F(8, 88) = 39.011$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .78$ and effect of third order interaction *Offset* \times *Geometry* \times *Time*: $F(16, 176) = 14.159$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .56$; *Offset* \times *Size* \times *Time*: $F(16, 176) = 2.199$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .17$; *Size* \times *Geometry* \times *Time*: $F(16, 176) = 6.621$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .38$.

Qualitative patterns found in the *Size* \times *Geometry* \times *Time* interaction suggest (see Figure 6.2.6) that in the Perpendicular and the Opened-angle Geometries, participants' likely-to-cross position gradually shifted from the gap's centre to a few meters ahead of it, on the lead vehicle side. In contrast, a very different pattern appears in the Closed-angle Geometry: in this condition participants began to get gradually lagged from the gap's centre before increasing their speed to aim at an area close to the gap's centre.

A post-hoc Scheffé demonstrated ($ps < .05$) that participants' likely-to-cross position was farther from the lead vehicle (and slightly behind the gap's centre) during the four last seconds of the trial in the Large-sized vehicles condition than in the Normal one. Such a difference appeared only in the Closed-angle Geometry and was not found significant in the Perpendicular and the Opened-angle Geometries. Over the three sizes conditions, no differences of likely-to-cross position were found to be significant in the Opened-angle Geometry and only transitional differences in the Perpendicular one (i.e., at the third and fourth second between the Small and Normal-sized vehicles condition).

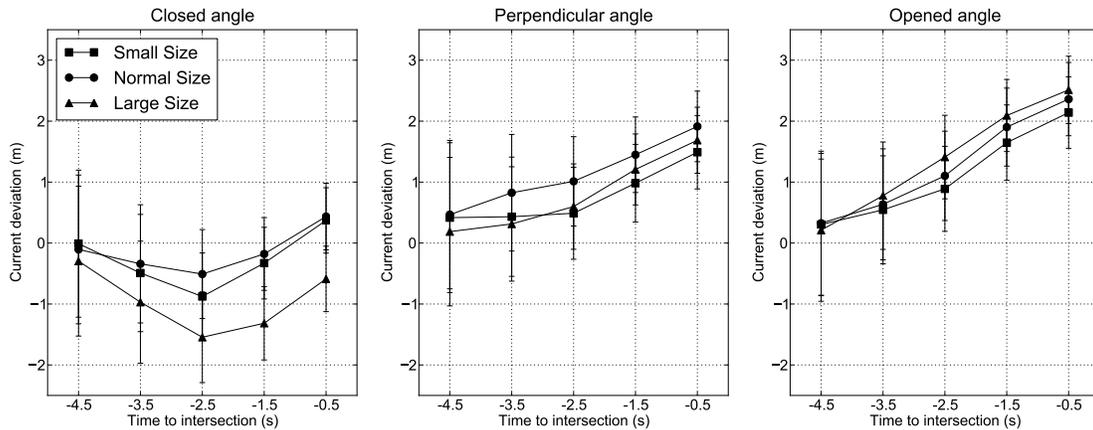


Figure 6.2.6: Current deviation profiles for Size x Geometry x Time interaction.

Dynamic sizes

Gap crossing position The position in the traffic gap at which participants crossed the intersection was on average slightly biased towards the lead vehicles, for a grand mean of 2.29 m (SD = 1.69 m). A two-way repeated measures ANOVA was realized on $Size_3 \times Geometry_3$ experimental design for the gap crossing location measure. Results showed a main effect of *Geometry*: $F(2, 22) = 46.741$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .81$; *Size*: $F(2, 22) = 13.274$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .55$.

More precisely, results revealed (post-hoc Scheffé, $ps < .05$) that participants crossed the intersection farther from the lead vehicle in the Closed-angle Geometry than in the others Geometries (see Figure 6.2.7, left panel). In contrast, the Perpendicular-angle Geometry did not induce a different behaviour compared to the Opened-angle Geometry. Results also showed (see Figure 6.2.7, right panel) that

participants crossed the intersection farther from the lead vehicle in the Small-to-normal-sized vehicles condition than in the other dynamic size conditions. Finally, no differences were found to be significant when comparing the Normal-sized vehicles condition to the Large-to-normal-sized one.

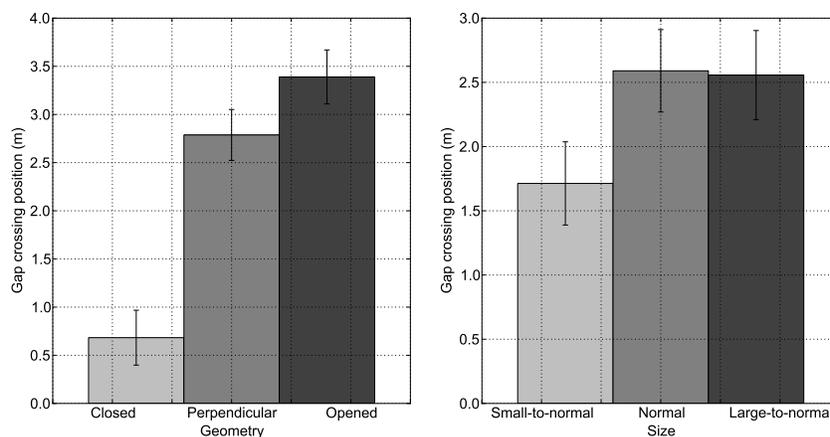


Figure 6.2.7: Gap crossing position for Geometry conditions (left) and for Size conditions (right).

Velocity profiles A three-way repeated measures ANOVA was realized on $Geometry_3 \times Size \times Time_5$ experimental design for velocity profiles. Results showed a main effect of *Size*: $F(2, 22) = 13.157$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .54$; *Geometry*: $F(2, 22) = 32.87$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .75$; *Time*: $F(4, 44) = 60.523$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .85$ and an effect of second order interaction *Geometry* \times *Time*: $F(8, 88) = 15.897$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .59$; *Size* \times *Time*: $F(8, 88) = 22.038$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .67$.

In accordance with observed behaviour in gap crossing position analyses, a post-hoc Scheffé realized on *Geometry* \times *Time* interaction evidenced ($ps < .05$) that participants drove at a lower speed during the last three seconds in the Closed-angle Geometry than in the Perpendicular one, whereas there were no differences in travelling speed between the Perpendicular and the Opened-angle Geometries (see Figure 6.2.8, left panel). In the same way, a Scheffé test realized on *Size* \times *Time* interaction evidenced ($ps < .05$) that participants drove at a lower speed during the last three seconds in the Small-to-large-sized vehicle condition than in the Normal-sized one. In contrast, no differences were found to be significant in travel speed when comparing the Normal-sized vehicle condition to the Large-to-normal one (see Figure 6.2.8, right panel).

Current deviation profiles A three-way repeated measures ANOVA was realized on $Geometry_3 \times Size_3 \times Time_5$ experimental design for velocity profiles. Results showed a main effect of *Size*: $F(2, 22) = 4.717$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .30$; *Geometry*: $F(2, 22) = 20.965$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .66$; *Time*: $F(4, 44) = 13.755$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .56$, an effect of second order interaction *Geometry* \times *Time*: $F(8, 88) = 23.713$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .68$; *Size* \times *Time*: $F(8, 88) = 20.097$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .65$ and an effect of third order interaction *Size* \times *Geometry* \times *Time*: $F(16, 176) = 1.819$, $p < .05$, $\eta_{partial}^2 = .14$.

Two qualitative patterns seemed to emerge over the three intersection geometries (see Figure 6.2.9). Indeed, in the Perpendicular and the Opened-angle Geometries, participants adjusted their speed in order to shift gradually their likely-to-cross position from the gap's centre to a few meters ahead of it.

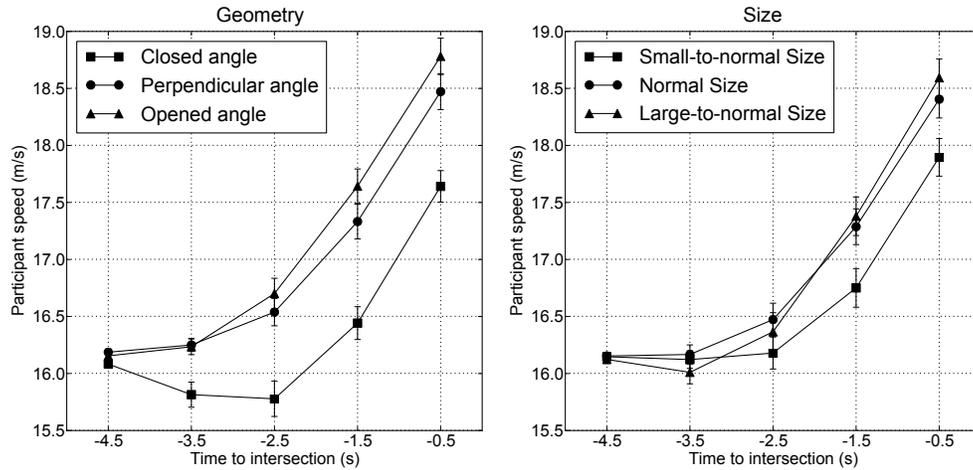


Figure 6.2.8: Velocity profiles for Geometry x Time interaction (left) and Size x Time interaction (right).

In contrast, in the Closed-angle Geometry, participants first got lagged from the gap's centre before to increase their speed to aim at an area close to the gap's centre. In this regard, a post-hoc Scheffé realized on *Size* × *Geometry* × *Time* interaction showed ($ps < .05$) that participants were likely to cross farther from the lead vehicle in the Closed-angle Geometry than in the Perpendicular one, during the three last seconds for the Small-to-normal-sized vehicles condition and during the four last seconds for the Large-to-small one. Finally, in the Perpendicular-angle Geometry, participants were likely to cross farther from the lead vehicle during the three last seconds in the Small-to-normal-sized vehicles condition than in the Normal one. Such a difference was not found to be significant in the others Geometry conditions.

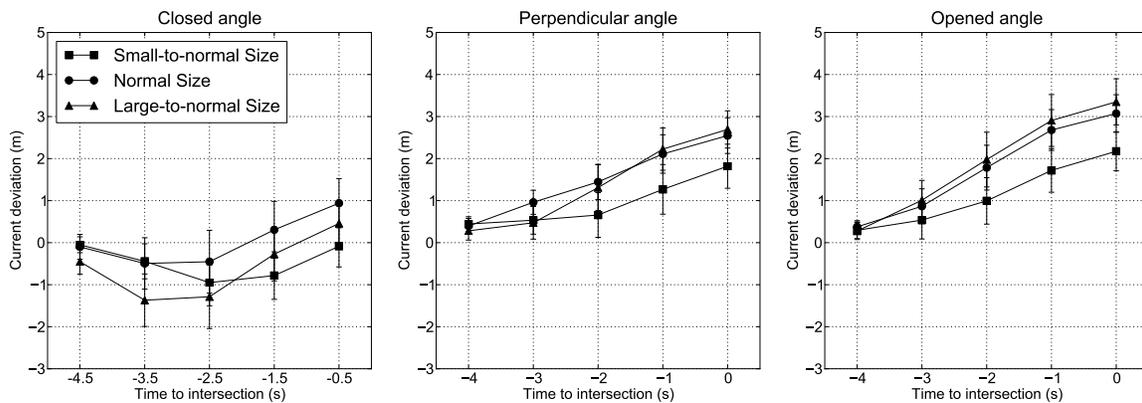


Figure 6.2.9: Current deviation profiles for Size x Geometry x Time interaction.

Discussion

Safely crossing an intersection requires drivers to enter and clear the intersection within the (space-time) interval formed by the lead and trail vehicles of a gap of appropriate size in the train of oncoming traffic.

We studied drivers' speed regulation patterns as they approached intersections of different geometries with the goal of safely passing through a traffic gap. We first discuss the velocity adjustments observed in relation to the actual temporal constraints with which participants were confronted (i.e., the Offsets) before turning our attention to the effect of experimental factors that impact the perception of these temporal constraints (intersection's geometry, optical size and optical size expansion) on velocity adjustments. Finally, we address the perceptuo-motor strategies that may underlie the observed behaviour.

Temporal constraints

Replicating the findings of [Louveton *et al.* \(2012b,a\)](#) for car drivers and [Chihak *et al.* \(2010\)](#) for cyclists, the present experiment demonstrated that participants regulated their velocity from the very early stages of the approach to the intersection onwards. In the current experimental setting the inter-vehicular gap always had the same size (2.23 s; 35 m) at the moment it crossed the participant's trajectory. Driving at a stabilized speed, participants started a trial at different distances from the intersection, leading to initial Offsets of -1 s (-15 m), 0 s (0 m), or +1 s (+15 m) with respect to the geometrical centre of the traffic gap at the moment of crossing the intersection. Note that in both the Late Offset and Early Offset conditions maintaining the initial velocity would still give rise to arriving at the intersection within the traffic gap, albeit fairly close to the trail or lead vehicles, respectively. Nevertheless, in the Late Offset conditions participants progressively increased their velocity. In the Early Offset conditions participants first progressively decelerated before re-accelerating in the last moments before crossing the intersection. In the No Offset conditions, participants maintained their initial velocity over the first part of the approach before accelerating in the vicinity of the intersection. Under all conditions, velocity adjustments were smooth and progressive. Analyses of the time-series of the current deviation from the centre of the traffic gap revealed that the observed velocity adjustments were functional, as they resulted in a gradual convergence of current deviation towards the centre of the traffic gap. Interestingly, although systematically initiated early on during the approach to the intersection, the adjustments observed did not fully compensate for the initial offsets (see [Chihak *et al.*, 2010](#); and [Louveton *et al.* \(2012b,a\)](#), for similar results). Finally, the drivers' propensity to accelerate in the final part of the approach resulted in crossing the intersection slightly ahead of the geometric centre of the traffic gap. Whatever the reasons underlying this last-minute acceleration, it is clear that it contributes to safely crossing the intersection, as the time spent on the intersection is minimized.

Intersection geometry

The first factor supposed to affect perception of temporal constraints is the intersection's geometry. Participants were confronted to three intersection geometries: perpendicular-angle, opened-angle and closed angle. Drawing hypothesis on the results obtained by [Louveton *et al.* \(2012a\)](#), we expected that participants crossed the intersection farther from the lead vehicle (in so doing they would have driven at a lower speed) in the Closed-angle Geometry than in the Perpendicular one, which in turn should have given rise to a gap crossing farther from the lead vehicle than in the Opened-angle Geometry. In this study, we replicated the propensity of participants to cross farther from the lead vehicle (thus their propensity to slow-down their speed over the trial's unfolding) when oncoming vehicles come from a Closed-angle Geometry. However, the symmetric speed-up effect associated with Opened-angle Geometry was not evidenced in this work. Three possible mechanisms may be involved in this behavioural

pattern. First, participants could have used the CBA strategy (see Introduction). In that case, the bearing angle (whatever the target it is referred to) exhibits smaller rate of change in Closed-angle Geometry than in Perpendicular one (see also Chardenon et al., 2005). Secondly, they could have used the optical size of the inter-vehicular gap. Indeed, optical size is smaller in Closed-angle Geometry than in Perpendicular one. The fact that inter-vehicular gap's size seems to play a significant role in speed adjustments (see Louveton *et al.*, 2012b) give support for such an hypothesis. Finally, participants could have used the optical size rate of expansion: Optical rate of expansion increases more rapidly in Closed-angle Geometry than in Perpendicular one. However, at this stage of analyses it is not yet clear which of these mechanisms is (are) involved in approach speed adjustments. More insight on this question could be risen from next sections. Indeed, if optical size plays a significant role on speed regulations we might observe an effect of optical size and optical expansion manipulations. Furthermore, as intersection's geometry modifies the way optical size and optical expansion vary, we also might observe interaction between the Geometry and Size manipulations factors.

Optical size

This work was mainly aimed at discovering the role of optical-size based variables on drivers' approach speed at intersections. We demonstrated that manipulated optical size of oncoming vehicles had a significant effect on behaviour and that this effect was magnified under particular intersection's geometry conditions. In static sizes condition, participants travelled at a lower speed and crossed farther from the lead vehicle jointly in the Large-sized vehicles condition and the Closed-angle Geometry than in others conditions. These results corroborated those obtained by Hancock *et al.* (1991); Caird et Hancock (1994). The fact that, in our experiment, vehicles' size was manipulated independently of the vehicles' type gives further support to the hypothetical use of optical-size based variable in order to control approach speed at intersection. Moreover, our experiment allows us to observe these patterns of the behaviour in the context of a time-to-time control of the vehicle instead of assessing the effect of optical size only in perceptual judgement/decision tasks. Indeed, using a perceptual judgement/decision task, (Hancock *et al.*, 1991; Caird et Hancock, 1994) could have been induced methodological bias toward the use of optical size as a predictor of TTC. However, our results not only corroborate those obtained by these authors but they also allow for a generalization over a continuous driving task. In contrast, in dynamic sizes condition, participants travelled at a lower speed and crossed farther from the lead vehicle in the Closed-angle Geometry condition and in the Small-to-normal sized vehicles condition (Small-sized vehicles that get normal-sized over the trial's unfolding) than in others conditions. The fact that over-decelerating behaviour is induced by the Large-sized vehicles in static sizes condition and by the Small-to-normal sized vehicles in dynamic sizes condition could sound contradictory but, is in fact congruent with existing literature.

In regard to the static sizes condition, studies about time perception and optical size of an approaching target showed that the larger is the target, the smaller the amount of remaining time is perceived (DeLucia, 1991; DeLucia et Warren, 1994; Heuer, 1993; Michaels *et al.*, 2001; van der Kamp *et al.*, 1997). In regard to the dynamic sizes condition, authors showed that optical expansion induce over-decelerating action before an interception (Schiff *et al.*, 1992; Schiff, 1965; Chardenon *et al.*, 2004). These results could make more sense if we consider that participants behaviour is oriented toward actor's safety (de Rugy *et al.*, 2001; Rushton et Wann, 1999). This behavioural criteria is particularly legitimated in situation in which injuries are possible.

Although these results strongly argue for the use of optical size and optical expansion, they are not compatible with the hypothesis of an accurate TTC perception based on these optical variables. Indeed, as suggested by [Bootsma et Craig \(2002\)](#), if participants would have used optical size and expansion to estimate TTC accurately, they would have not been influenced by the changes in approach angle. Our results don't corroborate such an hypothesis. Furthermore, previous studies had already pointed out inaccuracy of TTC estimation in case of non perpendicular approaches [Manser et Hancock \(1996\)](#); [Van Loon et al. \(2010\)](#).

Overall, these results lead us to the conclusion that optical size based variables are used to control approach speed to an intersection but also that optical expansion appears to account better for data than optical size itself. Indeed, in static sizes condition, the Large-sized vehicles' size exhibits faster rate of change (i.e., a faster optical expansion) than the Small-sized one. Moreover, in the Closed-angle Geometry optical expansion vehicles' size also exhibits faster rate of change than in others conditions of Geometry. Although the consecutive over-decelerating behaviour observed could be due to the manipulation of the optical size itself, to took it together with the fact that over-decelerating behaviour is also observed in the Closed-angle Geometry and in the Small-to-normal sized vehicles condition (i.e., over-expanding pattern of optical size in dynamic sizes condition) gives strong support for the hypothesis of the use of optical expansion as a control parameter of approach speed.

Limits of this study

However, we can discuss the fact that, in dynamic sizes condition, although the final gap's size remains the same, during the trial's unfolding the gap's size is expanding when the vehicles' size is reducing (Large-to-normal sized vehicles condition) and conversely, the gap's size is reducing when the vehicles' size is expanding (Small-to-normal sized vehicles condition). This fact could explain the over-deceleration behaviour in Small-to-normal sized vehicles condition. Indeed, [Louveton et al. \(2012a\)](#) demonstrated that, in small gap's size, participants drove at lower speed than in large gap's size condition. In the same way, if the gap's size is reducing it could be safe for participants to reduce their velocity in order to prevent an accident with a narrow gap. Nevertheless, it is hard to explain the absence of an over-accelerating counterpart effect in Large-to-normal sized vehicles condition. In fact, in [Louveton et al. \(2012b\)](#), it was demonstrated that participants drove at a higher speed when gap's size is expanding and symmetrically drove at lower speed when the gap's size is reducing. This fact taken together with the effect of manipulated size in static sizes condition, keep us from excluding optical size expansion as a control parameter for drivers' approach speed.

Conclusion

Finally, our previous results ([Louveton et al., 2012b,a](#)) lead us to the assumption that the rate of change of bearing angle could be a good candidate to provide information to drivers in order to both synchronize their vehicle's displacement with that of the traffic gap in order to intercept it, and de-synchronize their displacement with traffic vehicles in order to avoid to intercept them. Although the elegance of such an hypothesis, our results clearly demonstrated that bearing angle does not explain the whole behavioural pattern observed. Indeed, this work brings further argument on the use of optical expansion as a control parameter for approach speed. These results particularly corroborate the idea of a safety principle tuned toward the imminent approach of a moving object and that would be mediated by optical expansion. The next step is now to provide an integrative model of drivers behaviour at intersection. This model

should take into account both optical variables (optical expansion and rate of change of the bearing angle) in a complementary fashion: rate of change of the bearing angle would inform drivers about the lateral displacement of the target (the free traffic gap) while optical expansion would inform drivers about the imminence of traffic arrival into the intersection.

Troisième partie

Discussion générale

Chapitre 7

Discussion

L'objectif de ce travail était de mieux comprendre comment les conducteurs contrôlent le déplacement de leur véhicule dans le but de traverser une intersection sans collision avec le trafic entrant. Plus particulièrement, nous nous sommes intéressés aux processus perceptifs et moteurs qui, dans leur dynamique temporelle, aboutissent à un contrôle de la vitesse d'approche du véhicule afin de traverser l'intersection de façon sûre et efficace. Bien que la littérature sur les actions visuellement guidées révèle l'importance de l'interaction continue entre perception et action, et la conduite automobile en est une illustration, cette activité semble avoir été très peu étudiée sous cet angle. Nous avons donc réalisé une série d'expérimentations sur simulateur de conduite afin de démontrer la nécessité d'étudier le couplage perception-action dans l'étude de la conduite en intersection. Ces études devaient également nous permettre de préciser les modalités d'un tel couplage et de tenter d'identifier les stratégies perceptivo-motrices qui pourraient être utilisées par les conducteurs dans cette situation. Dans ce chapitre, nous rappellerons les principaux résultats de ce travail de thèse avant d'en tirer une synthèse des apports et des limites. Cette synthèse nous conduira à proposer des perspectives qui dépassent le cadre de ce travail.

7.1 Rappel des principaux résultats

La première expérience (Chapitre 4) nous a permis de mettre en évidence que les conducteurs régulent leur vitesse d'approche à une intersection de façon continue et graduelle au cours du temps. De plus, la manipulation des contraintes temporelles initiales a révélé que les participants ont compensé dans chaque condition d'offset leur décalage initial par rapport au centre de la fenêtre et ce, bien qu'il eut été à chaque fois possible de traverser sans ajustement de vitesse après le début de l'essai. Les participants ont ainsi ajusté graduellement leur vitesse dans le but de traverser la fenêtre dans une zone spatiale et temporelle restreinte, proche du centre et de façon générale du côté du véhicule « lièvre ». Ce comportement, qui consiste à annuler l'amplitude initiale des positions de traversée (imposées par le facteur d'offset) pour se rapprocher d'une position de traversée restreinte, est la signature d'une action dirigée vers un but. Or, traverser la fenêtre inter-véhiculaire de façon systématique dans une zone restreinte est un comportement particulièrement compatible avec celui d'un comportement d'interception de mobile se déplaçant horizontalement. Ces résultats nous ont conduits à faire l'hypothèse que la traversée d'une fenêtre en mouvement était une généralisation des tâches d'interception de mobile à un créneau spatial

et temporel plus large que celui d'une cible ponctuelle. Par ailleurs, les manipulations de la taille de la fenêtre inter-véhiculaire et de l'angle d'approche des véhicules ont mis en évidence que les ajustements de vitesse des participants sont en partie contrôlés par un principe de « sécurité ». Ce principe de sécurité prendrait en compte à la fois les contraintes imposées par la fenêtre (sa taille et le temps disponible pour la franchir) et la façon dont ces contraintes sont perçues (l'angle d'approche des véhicules du trafic). De façon générale, ces résultats ont permis d'objectiver un comportement d'ajustement de la vitesse de déplacement à la fois graduel et dirigé vers un but. L'observation d'un tel comportement légitime l'utilisation d'une méthodologie permettant l'étude du couplage perceptivo-moteur réalisé par les conducteurs. Finalement, ces résultats permettent d'apporter des arguments en faveur de l'hypothèse d'un contrôle de la vitesse de déplacement du véhicule proche de celui observé dans les tâches d'interception et qui pourrait ainsi être fondé sur les variations de l'angle de relèvement d'un des éléments de la fenêtre (e.g., un des deux véhicules et/ou le centre de la fenêtre).

Dans la seconde expérience (Chapitre 5), nous nous sommes posés la question de la contribution spécifique des différents éléments de la fenêtre dans les ajustements que les conducteurs opèrent sur leur vitesse d'approche. Pour cela, nous avons manipulé de façon indépendante à la fois les caractéristiques « locales » de la fenêtre inter-véhiculaire (cinématique indépendante des deux véhicules qui la forment) et les caractéristiques « globales » de la fenêtre (cinématique du centre de la fenêtre et l'évolution de sa taille au cours du temps). Les résultats montrent que le comportement des participants est régi à la fois par les caractéristiques locales et globales de la fenêtre. Concernant les caractéristiques locales, la vitesse des participants est particulièrement affectée par la cinématique propre du premier véhicule. Ce résultat considéré avec la tendance des participants à traverser du côté du véhicule « lièvre », confirme l'importance de ce véhicule dans la stratégie de traversée qu'ils utilisent. Traverser la fenêtre proche du véhicule « lièvre » est une solution prudente car elle maximise la marge de sécurité vis-à-vis du second véhicule qui ferme la « fenêtre » ; de ce fait, réguler la vitesse d'approche en fonction du véhicule « lièvre » semble très cohérent avec les résultats obtenus dans les recherches antérieures. En effet, non seulement les conducteurs semblent porter leur attention sur les objets dont l'arrivée est imminente ([Rushton et Wann, 1999](#)), mais aussi, la perception du temps d'arrivée est moins précise quand le temps d'arrivée réel augmente ([Caird et Hancock, 1994](#); [Van Loon et al., 2010](#)). Concernant les caractéristiques globales, les régulations des participants ont été autant influencées par la cinématique du centre de la fenêtre inter-véhiculaire que par l'évolution de sa taille. L'impact des caractéristiques locales et globales sur le comportement des participants montre que celui-ci est organisé à différents niveaux. Ainsi, nous avons envisagé l'hypothèse selon laquelle les contributions locales pourraient être mises en jeu dans le cadre d'une stratégie d'évitement de collision référée aux deux véhicules formant la fenêtre (car les conducteurs cherchent à éviter la collision avec ces véhicules), tandis que les contributions globales pourraient être mises en jeu dans le cadre d'une stratégie d'interception référée à un emplacement à l'intérieur (e.g., le centre) de la fenêtre inter-véhiculaire (car les conducteurs cherchent à utiliser les créneaux libres du trafic).

Au-delà de ces résultats expérimentaux, nous avons réalisé une simulation numérique afin d'évaluer la plausibilité de l'utilisation de la stratégie CBA dans cette situation. Cette simulation numérique (voir la méthodologie dans l'annexe C) a été réalisée sur la base des données de cette dernière expérience. Le but d'une telle simulation numérique est de quantifier la capacité explicative du modèle vis-à-vis des données obtenues durant l'expérience. Comme nous faisons l'hypothèse que les participants ont tenté d'intercepter un emplacement à l'intérieur de la fenêtre inter-véhiculaire (e.g., le centre de celle-ci ou

un point qui en est proche), cette expérience se prête particulièrement bien à la mise à l'épreuve de la stratégie CBA. En effet, les variations indépendantes de vitesse des véhicules modifient la façon dont varie l'angle de relèvement (i.e., qui est directement liée aux accélérations du centre de la fenêtre ^a) tandis que les conditions finales de traversée sont toujours identiques quels que soient les paramètres initiaux de vitesse et d'accélération de ces véhicules. En d'autres termes, si les participants utilisent l'angle de relèvement référé au centre de la fenêtre (ou éventuellement à un autre emplacement à l'intérieur de celle-ci) pour l'intercepter, alors les participants devraient moduler leur vitesse de déplacement durant toute l'approche de l'intersection, en fonction de l'accélération de l'emplacement visé et donc indépendamment des contraintes finales de traversée qui restent identiques. Nous nous plaçons ainsi dans les meilleurs conditions pour observer un contrôle du comportement fondé sur le CBA.

Nous avons ainsi testé ^b le pouvoir explicatif du modèle CBA présenté dans la Section 2.3.2 sous sa forme simplifiée (cf., Équation 2.3.6) et sa forme avec deux termes d'amortissement (cf., Équation 2.3.7). Les résultats de la recherche des meilleurs coefficients (cf., Annexe C.3) montrent clairement que les deux lois de contrôle testées prédisent un comportement très proche de celui observé dans la condition d'Offset nul (RMSE de 1,36 pour le modèle simplifié et 1,68 pour le modèle avec amortissement) : les résultats pour la loi CBA avec termes d'amortissement dans cette condition peuvent être trouvés dans la Figure 7.1.1.

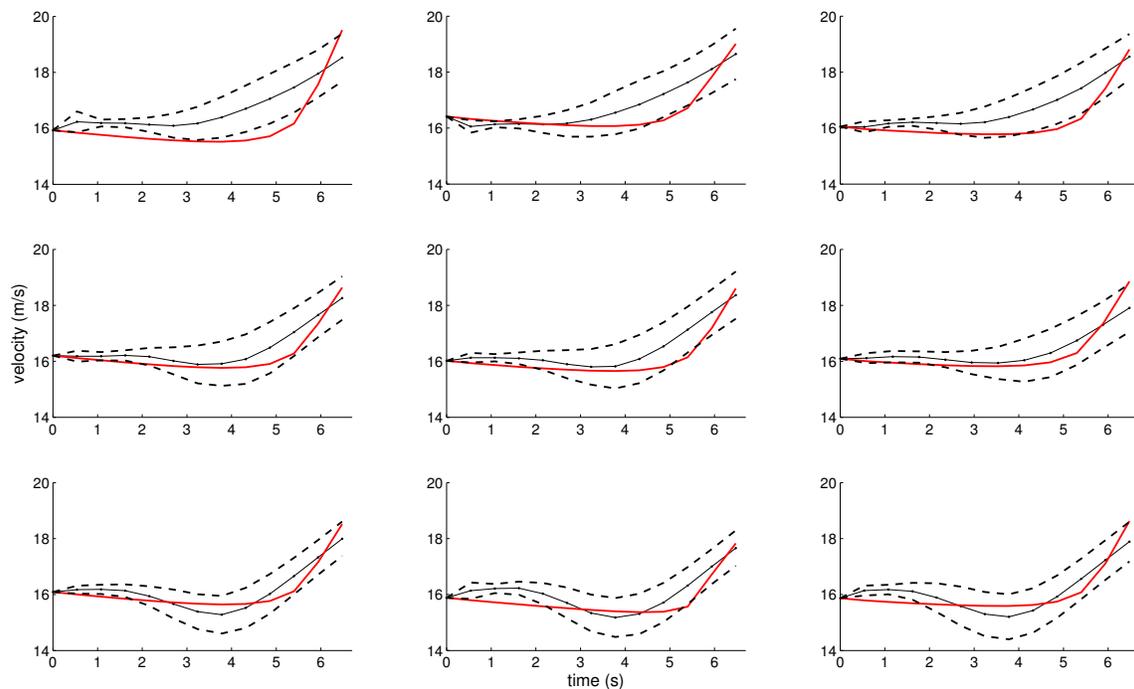


FIGURE 7.1.1 – Exemple de modélisation utilisant le modèle CBA avec amortissement (Équation 2.3.7) dans la condition d'Offset nul. La ligne rouge correspond au modèle tandis que la ligne noire correspond au comportement moyen des participants (la zone grise correspond à l'écart-type).

En revanche, seule la loi de contrôle avec amortissement donne des résultats plausibles pour la condition d'Offset Avance (RMSE de 6,39 et 2,21 respectivement) et aucune des deux lois de contrôle ne donne

^a $Accélération_p = Accélération_{chasseur} + p/précision \times \|Accélération_{chasseur} - Accélération_{lièvre}\|$ avec p l'emplacement à l'intérieur de la fenêtre, précision le nombre de point définit dans la fenêtre et $p \in [0; précision]$

^bLa méthodologie employée pour réaliser cette modélisation numérique est détaillée en Annexe C.

de bons résultats dans la condition Offset Retard (RMSE de 8,12 et 11,89, *idem*). Il semble donc que les termes d'amortissement permettent une meilleure prédiction des décélérations comme celles observées dans la condition d'Offset Avance. Cependant, il semblerait que l'accélération continue observée dans la condition d'Offset Retard ne s'explique pas par l'utilisation d'une stratégie CBA. Globalement, au regard de ces données de simulation, la loi de contrôle CBA peut donner une explication plausible du comportement mais seulement dans certaines conditions. De ce fait, il se pourrait que cette stratégie ne soit pas suffisamment robuste, à elle seule, pour expliquer le comportement des conducteurs dans toutes les conditions. A cet égard, la dernière expérience permet d'envisager des pistes de stratégies complémentaires.

Dans notre dernière expérience (Chapitre 6), nous avons considéré la tâche de traversée d'intersection comme une tâche de (dé-)synchronisation du déplacement du conducteur vis-à-vis de celui du trafic entrant dans l'intersection. D'une part, les conducteurs chercheraient à synchroniser leur déplacement (i.e., à intercepter) avec celui de la fenêtre inter-véhiculaire (cf., caractéristiques globales ci-dessus). D'autre part, ils chercheraient à désynchroniser leur déplacement (i.e., à éviter une collision) avec les véhicules du trafic (cf., caractéristiques locales ci-dessus). Une telle stratégie, fondée uniquement sur l'utilisation du taux de changement de l'angle de relèvement, permettrait d'expliquer de façon parcimonieuse les deux comportements d'interception (utilisation du CBA) et d'évitement de collision (CBA inversé). Nous avons ainsi mis à l'épreuve expérimentalement l'hypothèse de l'utilisation exclusive de la stratégie CBA dans notre situation. Pour cela, nous avons testé l'utilisation potentielle par les conducteurs d'autres informations visuelles que sont la taille optique et l'expansion optique des véhicules du trafic. Toujours en exploitant le même protocole, nous avons manipulé spécifiquement soit la taille optique des véhicules (petite, normale ou grande), soit leur expansion optique (sur-expansion, expansion normale ou sous-expansion). Il est important de comprendre que les manipulations de taille et d'expansion optiques n'affectent pas les variations d'angle de relèvement. Nous avons également manipulé l'angle d'approche des véhicules du trafic (cf., Chapitre 4) qui impacte la façon dont sont perçues la taille et l'expansion optiques. Les résultats ont clairement montré que le contrôle de la vitesse d'approche est influencé à la fois par la manipulation de la taille optique des véhicules mais aussi par celle de leur patron d'expansion. Les participants décélèrent plus quand les véhicules du trafic sont de grande taille par rapport aux autres conditions de taille. Inversement, ils décélèrent plus dans les situations où les véhicules commencent l'essai avec une petite taille qui augmente progressivement jusqu'à la normale (sur-expansion), que dans les autres conditions d'expansion optique. Enfin, nous observons ce même phénomène de décélération dans les conditions présentant un angle d'approche fermé par rapport aux autres conditions de géométrie. Dans leur ensemble ces résultats montrent que la façon dont les participants contrôlent leur véhicule est clairement influencée par le patron d'expansion optique des véhicules du trafic et plus précisément par la situation de sur-expansion (i.e., effet des grands véhicules en taille statique, des petits en taille dynamique et de l'arrivée en angle fermé). Ces résultats font sens dans la mesure où ils corroborent l'idée d'un principe de « sécurité » qui serait fondé sur l'imminence de l'approche des véhicules du trafic (comme cela a déjà été suggéré dans la littérature). En effet, la sur-expansion optique est corrélée avec une arrivée imminente d'un objet en mouvement vers l'observateur. Ces résultats permettent d'atténuer l'hypothèse de l'utilisation exclusive du taux de changement de l'angle de relèvement dans notre situation. En effet, l'expansion optique semble particulièrement impliquée dans les régulations comportementales observées. Au final, il reste possible d'envisager la mise en œuvre par les conducteurs soit de deux stratégies complémentaires chacune fondée sur une information visuelle indépendante (i.e., le taux

de changement de l'angle de relèvement et le TTC fondé sur l'expansion optique), soit d'une version « élargie » de la stratégie CBA (Bootsma et Craig, 2002; Jacobs et Michaels, 2006) qui prendrait en compte les deux types d'information.

7.2 Synthèse et problématisation

L'un des objectifs principaux de cette thèse était de légitimer l'étude du couplage perception-action dans les tâches de traversée d'intersection. Les résultats obtenus nous permettent clairement de démontrer l'intérêt d'une telle approche. En effet, nous mettons en évidence le contrôle continu de la vitesse de déplacement des conducteurs à l'approche de l'intersection. Les résultats que nous avons obtenus nous ont également permis de répliquer des résultats déjà connus dans la littérature concernant les traversées d'intersection, comme l'effet des contraintes du trafic (Hancock *et al.*, 1991; Caird et Hancock, 1994), de la taille des véhicules (*idem*) et de l'angle d'arrivée du trafic (Manser et Hancock, 1996; Van Loon *et al.*, 2010).

Au-delà des résultats spécifiques aux stratégies perceptivo-motrices (information visuelle utilisée, loi de contrôle) que nous avons obtenus, nous pensons qu'une facette importante de notre contribution à la littérature sur la conduite en intersection correspond à l'utilisation d'un cadre théorique issu du champ des actions visuellement guidées. Ce basculement théorique nous permet de discuter les résultats antérieurs sous un nouvel angle.

En effet, dans les études antérieures les auteurs faisaient l'hypothèse que les conducteurs tentent de se construire un modèle interne de la situation, qui soit le plus exact possible et qui leur permette de faire une "simulation" de l'évolution des différentes composantes de l'environnement (cf., paradigme de disparition, Section 2.1.1). Dans ce cadre, les auteurs font par exemple l'hypothèse que les conducteurs utiliseraient la taille optique des véhicules du trafic afin d'accéder au Temps de pré-Contact relatif à ceux-ci (Lee, 1976) afin de construire un modèle mental de la situation (i.e., ici en terme de temps restant avant l'arrivée d'un véhicule du trafic) pour pouvoir prendre une décision appropriée (i.e., engager une manœuvre de traversée).

Pour rester sur cet exemple, nous apportons aussi des arguments en faveur de l'utilisation de la taille optique des véhicules du trafic dans la traversée d'intersection (voire Chapitre 6). Cependant, nous ne faisons pas l'hypothèse de la construction d'un modèle interne de la situation dans le but d'en réaliser une "simulation" ou une "prédiction" de son évolution (les raisons théoriques en sont détaillées dans le Section 2.2) en utilisant des connaissances et des lois *a priori* sur la situation en question. Au contraire, nous avons fait l'hypothèse que le contrôle de l'action était opéré "en ligne" sous l'influence d'informations visuelles simples d'accès, or nous avons montré que le contrôle du déplacement du véhicule se faisait de façon continue dans le décours temporel. Pourtant, il est facile d'argumenter contre notre approche en affirmant que la capacité "d'anticipation" d'un agent est nécessaire pour la réussite globale de la tâche, c'est-à-dire au-delà de l'ajustement ponctuel du comportement face aux variations de l'environnement. En d'autres termes, il pourrait être argumenté que, selon notre approche, les conducteurs auraient un comportement uniquement "réactif" et que la réussite de la tâche ne serait que fortuite, ce qui ne serait pas représentatif du comportement humain.

Il est possible sur ce point de discuter la notion même "d'anticipation". En fait, nous argumenterons en affirmant qu'un agent ne doit pas nécessairement faire appel à un modèle interne de la situation, ni ne doit en simuler l'évolution afin "d'anticiper" l'évolution d'une situation et de s'y adapter dans sa

globalité. Nous nous appuyons sur la distinction que [Stepp et Turvey \(2010\)](#) font entre l’anticipation faible et l’anticipation forte. Selon ces auteurs, l’anticipation est faible quand un système (i.e., l’agent) utilise un modèle interne pour prédire l’évolution d’un autre système (i.e., l’environnement). Ce type d’anticipation est caractérisé par le calcul des états courants sur la base des états futurs potentiels de l’environnement. Au contraire, l’anticipation est forte quand l’anticipation est produite sur la base d’informations continues (flux d’événements temporel) et relatives au système agent-environnement dans sa globalité. En effet, selon ces auteurs, l’utilisation d’informations spécifiant l’état du système agent-environnement ainsi que son évolution permet non seulement une adaptation graduelle de l’agent aux contraintes changeantes de son environnement mais aussi une adaptation à l’évolution globale du système agent-environnement (cf., Section [2.2.2](#)).

Cette distinction entre anticipation faible et forte fait particulièrement écho à la distinction faite entre stratégies prédictive et prospective décrites par [Bastin *et al.* \(2006b\)](#). En effet, ces auteurs ont montré que dans une tâche d’interception de cible se déplaçant horizontalement, les participants utilisaient une stratégie fondée sur les variations de l’angle de relèvement plutôt qu’une stratégie fondée sur la vitesse requise pour atteindre la cible (sur la base de la taille optique de la cible et le Temps de pré-Contact). Il est à rappeler que le taux de changement de l’angle de relèvement spécifie l’interception d’une cible à un instant donné (i.e., dérivée nulle) mais ne spécifie pas de dimension physique de l’environnement (i.e., temps, distances et vitesses). Les variations de l’angle de relèvement permettent donc de réussir l’interception d’une cible sans connaître les dimensions physiques de la situation. C’est l’ajustement continu du comportement aux variations d’angle de relèvement qui permet la réussite de l’intersection. Ceci est possible dans la mesure où le taux de changement de l’angle de relèvement est un invariant spécifiant l’interception d’une cible sans connaissances préalables des variations de celui-ci (e.g., ces variations peuvent être manipulées, à contraintes de situations égales, en jouant sur la courbure de la trajectoire de la balle, voir [Bastin *et al.*, 2006b](#)).

De ce point de vue, nos travaux permettent clairement d’envisager une nouvelle interprétation du comportement des conducteurs. En effet, nous montrons par nos résultats que les comportements qui pourraient être qualifiés de “haut niveau” comme l’anticipation de l’arrivée d’un train de véhicule ou la prise de décision pourraient recevoir une autre explication que celle de la prédiction des états futurs d’une situation sur la base d’une perception des caractéristiques initiales de celle-ci et de règles de fonctionnement intériorisées. Au contraire, nos travaux en accord avec ceux précédemment réalisés dans le champ du contrôle moteur, montrent qu’il est possible de s’adapter à une situation sans en avoir un modèle interne mais au contraire d’ajuster son comportement de façon continue, en se basant sur des informations facilement perceptibles, et qui spécifient la réussite de la tâche. Ainsi, nous pensons avoir apporté la preuve que le taux de changement de l’angle de relèvement et celui de la taille optique pourraient être des hypothèses d’informations utilisables, cohérentes avec ces principes.

Ces constats soulèvent deux questions. La première est celle de l’homogénéité théorique entre différents niveaux de comportement. Comme nous l’avons vu dans la section [1.1.3](#), [Rasmussen \(1983\)](#) décrit le comportement d’un agent humain comme étant contrôlé par trois niveaux d’abstraction. L’étude du couplage perception-action nous situe naturellement sur la couche la moins abstraite, c’est-à-dire celle des habilités perceptivo-motrices. Néanmoins, l’un des enjeux des théories portant sur le couplage perceptivo-moteur est d’étendre leur puissance explicative au-delà de ce niveau pour expliquer des comportements plus abstraits comme celui de la prise de décision. Dans ce cadre, la démonstration de la capacité prédictive du couplage perceptivo-moteur (cf., anticipation forte) va dans ce sens puisqu’elle

explique un comportement *a priori* abstrait (i.e., prédire l'évolution d'un système), en se fondant uniquement sur la spécification d'informations relatives au système agent-environnement. Dans le chapitre suivant nous traiterons également d'un cadre théorique qui pourrait donner des pistes concernant le comportement de prise de décision (Section 8.1).

La seconde question est celle de la possibilité d'intégrer dans une loi de contrôle deux informations différentes. Par exemple, [Bastin et al. \(2008\)](#) ont montré que l'expansion optique était impliquée en même temps que l'angle de relèvement dans les régulations comportementales observées dans une tâche d'interception. De façon plus générale, différents auteurs ont critiqué l'hypothèse selon laquelle une seule information serait utilisée pour contrôler une activité ([Tresilian, 1991, 1994, 1999](#); [Hancock et Manster, 1997](#)). A cet égard, [Wilkie et Wann \(2003, 2005\)](#) ont proposé un modèle intégratif de plusieurs informations (flux rétinien, direction du regard et informations vestibulaires) afin de préciser le poids de chacune dans le contrôle de la direction. D'autres études ont montré par ailleurs que l'information utilisée par un agent pour contrôler une activité pouvait changer au décours de la réalisation de celle-ci ([Caljouw et al., 2004](#)) ou pouvait dépendre de l'expertise et être modifiée par l'apprentissage ([Huet et al., 2011](#)). Selon ces auteurs le système perceptivo-moteur serait flexible et apprendrait à utiliser différentes informations en fonction des contraintes de la tâche.

Comme nous l'avons déjà dit, nos résultats montrent qu'une seule information visuelle n'est peut-être pas suffisante dans toutes les situations. Ainsi, le taux de changement de l'angle de relèvement du centre de la fenêtre pourrait être utilisé pour synchroniser le déplacement du conducteur avec la fenêtre à intercepter et l'expansion optique des véhicules du trafic pourrait servir une stratégie d'évitement de collision fondée sur le Temps de pré-Contact. A cet égard, [Bootsma et al. \(1997\)](#), [Bootsma et Craig \(2002\)](#) et [Jacobs et Michaels \(2006\)](#) proposent l'intégration dans une seule loi de contrôle des deux informations d'angle de relèvement et d'expansion optique. Toutefois, contrairement aux tâches d'interception qui sont très contraintes (interception d'une balle), nous avons utilisé dans nos travaux une tâche plus tolérante : il était possible de réussir la tâche en traversant la fenêtre à différents emplacements et elle autorisait donc une grande diversité de comportement en amont. Ainsi, nos résultats pourraient aller à l'encontre de l'hypothèse d'annulation de l'erreur par rapport à un comportement prescrit par une seule information visuelle (hypothèse fondamentale des lois de contrôle [Warren, 1988](#)). Au contraire, nos résultats nous conduisent plutôt à envisager que l'observation d'un comportement guidé strictement par l'annulation de l'erreur vis-à-vis d'une valeur cible est un effet secondaire de tâches très contraignantes (i.e., avec une faible marge de manœuvre) et que l'étude de tâches plus tolérantes met en évidence l'utilisation d'informations multiples (i.e., plusieurs lois de contrôle sont valables pour réussir la tâche).

Chapitre 8

Perspectives

Dans cette partie nous envisageons des pistes de recherche qui pourraient faire suite aux recherches menées dans ce travail. Nous envisageons tout d'abord la possibilité d'intégrer les capacités d'action dans notre analyse de la situation de traversée. Nous proposons également des pistes pour utiliser le résultat de notre travail (ou plus largement des recherches utilisant la même méthodologie) dans la conception de systèmes d'assistance à la conduite.

8.1 Du contrôle aux affordances

Dans nos travaux nous avons volontairement écarté la notion d'affordance (i.e., du choix du mode d'action) pour nous concentrer sur celle du contrôle de l'action. Nous montrons dans les sections qui suivent que non seulement il existe une relation continue entre affordance et contrôle, mais aussi que l'étude conjointe de ces deux phénomènes nous permettrait d'aller plus loin dans l'explication du comportement des conducteurs.

8.1.1 Deux problématiques complémentaires

Les deux notions d'affordance et de contrôle sont deux notions centrales de la théorie de la perception directe. Néanmoins, ces problématiques sont classiquement abordées de façon indépendante. [Warren \(1988\)](#) propose en effet une séparation claire entre les deux problématiques. Le concept d'affordance répond à la question de la possibilité ou non de réaliser une action et à celle qui en découle du choix de mode d'action à mettre en œuvre dans la situation concernée. Le concept de contrôle répond quant à lui à la question de la façon dont va être contrôlée l'action sélectionnée. De façon générale les études concernant les affordances utilisent une méthodologie issue de la psychophysique (mais voir [Oudejans et al., 1996b](#), Section 2.1.2). Il s'agit de trouver le seuil, qui le long d'une variable continue, discrimine une décision binaire : en l'occurrence la possibilité perçue de réaliser une action donnée. Par exemple, [Warren \(1984\)](#) étudie la possibilité perçue de monter une marche d'escalier (locomotion bipédique uniquement). La réponse binaire est donc le jugement « oui/non » tandis que les variables continues utilisées sont la hauteur de la marche d'escalier et la longueur de la jambe de l'acteur. Dans cette étude, l'auteur montre que la variable pertinente pour trouver le seuil de décision est la valeur π , qui est le rapport de la

longueur de la jambe et de la hauteur de la marche. En effet, le seuil de prise de décision est caractérisé par une valeur critique de π spécifique à un mode d'action. C'est ce rapport (π) qui permet de décrire le comportement de différents acteurs indépendamment des caractéristiques de l'environnement (hauteur de marche) et de l'acteur (longueur de jambe) considérés séparément.

Les études portant sur le contrôle de l'action, quant à elles, neutralisent la question des affordances en tenant pour acquise la possibilité de réaliser la tâche : dans ce cas, ce qui est étudié c'est la réalisation temporelle de l'action en prenant en compte la relation entre une variable informationnelle et une variable motrice. Il s'agit clairement du type de recherche que nous avons mené dans ce travail. Ainsi, si nous nous rapprochons du contexte de la traversée d'intersection à l'intérieur d'un créneau libre du trafic, l'étude des affordances aurait consisté en la détermination de la taille des créneaux à partir de laquelle les conducteurs « acceptent » de traverser (Oudejans *et al.*, 1996b; Caird et Hancock, 1994), tandis que l'étude du contrôle du déplacement afin de traverser dans une fenêtre « acceptable » a été couvert par nos études et celles de Chihak *et al.* (2010). De ce point de vue, la séparation stricte entre les deux problématiques semble être justifiée à la fois par une différence de rôle dans le déroulement du comportement (sélection du comportement avant sa réalisation) et par une différence de nature entre les deux objets d'études (phénomène discret vs. continu).

Pourtant, bien que cette séparation qualitative soit opérationnelle, elle pourrait masquer une possible interaction des deux types de processus, voire d'un possible continuum. En effet, dans leurs réflexions préliminaires sur le comportement de conduite automobile, Gibson et Crooks (1938) proposent que les conducteurs percevaient un champ de conduite sécurisé (FST, cf. Section 2.2.3). Ce champ est constitué par l'ensemble des trajectoires que le conducteur peut emprunter avec son véhicule et qui serait perçu et modifié, à chaque instant en fonction des capacités d'action du conducteur médiées par son véhicule (accélération, freinage, changement de direction) et des contraintes de l'environnement (infrastructure, obstacles fixes et mobiles). Rétrospectivement, cette notion de FST (apparue avant les conceptualisations plus avancées de perception directe et d'affordances) met selon nous en évidence une possibilité de synthèse entre les notions de contrôle et d'affordance. Effectivement, d'une part le FST définit les affordances présentes dans la situation puisqu'il comprend l'ensemble des opportunités d'action de l'acteur dans son environnement, et d'autre part il définit la réalisation concrète du contrôle de l'action puisque qu'il spécifie l'ensemble des trajectoires qui peuvent être mise en œuvre. Autrement dit, l'affordance d'une circulation sûre est définie partout où le véhicule peut être contrôlé sans collision. Les deux concepts se définissent donc mutuellement même s'il peuvent être étudiés séparément.

De nouveaux développements permettent de voir la relation affordance-contrôle sous un autre angle. Warren (2006) décrit le comportement comme un système dynamique dont l'évolution serait déterminée par un ensemble d'attracteurs et de répulseurs. Un attracteur est un état du comportement vers lequel l'acteur va tendre durant la réalisation de sa tâche et il va tenter de s'y maintenir. Il s'agit donc d'un état de dépense minimale d'énergie (absence d'action). Inversement, les répulseurs sont des états dans lesquels l'acteur ne reste pas et dont il tente de s'éloigner le plus possible. Les répulseurs requièrent de la part de l'acteur une dépense énergétique qui est d'autant plus forte que l'acteur en est proche. L'ensemble des attracteurs et répulseurs forme un « paysage » dont les dimensions sont les variables informationnelles. A chaque coordonnée de cette espace est associée une quantité d'énergie.

Si l'on considère qu'un acteur cherche à minimiser les efforts qu'il a à produire, l'acteur va donc parcourir ce paysage en évitant le plus possible les répulseurs et va finir par « tomber » dans un bassin attracteur dans lequel la dépense énergétique associée à chaque paramètre informationnel est optimale.

Ce modèle est élégant car il fournit une forme généralisée de la loi de contrôle à plusieurs dimensions (i.e., informations), qui permet de rendre compte d'un comportement complexe d'une façon très parcimonieuse, sans devoir invoquer de nombreux processus de traitements de l'information.

Un aspect intéressant de ce type de modélisation est le concept de bifurcation. Dans certains états, le comportement de l'acteur est instable, peut suivre deux « chemins » et peut donc basculer soit vers un attracteur soit vers un autre. En fait, la notion de bifurcation recouvre celle du choix du mode d'action : ce sont les contraintes imposées par l'environnement et spécifiées par les variables informationnelles qui font basculer l'acteur vers un attracteur ou un autre (i.e., deux modes d'action possibles). En d'autres termes, une analyse de l'effet d'un ensemble de variables informationnelles sur le comportement pourrait donner une solution continue à un problème qui peut sembler qualitatif de prime abord (le choix du mode d'action). Autrement dit, le contrôle de l'action serait modélisé par le « parcours » du paysage par l'acteur tandis que le choix du mode d'action serait représenté par les bifurcations. En utilisant une telle modélisation il serait possible de décrire les notions d'affordance et de contrôle, ainsi que leur réciprocity fonctionnelle : les affordances existent là où il est possible de contrôler l'action (attracteurs) tandis que les changements de mode d'action se réalisent là où l'action n'est plus « contrôlable » (bifurcations).

8.1.2 Rattachement à d'autres niveaux de contrôles

Modéliser le comportement comme un système dynamique se déplaçant dans un espace d'attracteurs-répulseurs pourrait donner une explication plus parcimonieuse au comportement des conducteurs. Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1 de ce travail, le comportement du conducteur automobile peut être contrôlé selon différents niveaux d'opérations cognitives. Ainsi, Rasmussen (1983) décrit trois niveaux de comportement : un niveau de prise de décision et d'interprétation, un niveau de déclenchement de règles apprises et un niveau de contrôle perceptivo-moteur. Dans notre travail nous n'avons pas sollicité d'autres niveaux comportementaux, notamment dans la mesure où la tâche n'était pas ambiguë (i.e., n'impliquait pas de prise de décision) et portait sur des mécanismes de contrôle peu sensibles aux opérations cognitives de haut niveau (e.g., connaissances antérieures).

Par ailleurs, nous nous sommes accommodés d'une certaine flexibilité théorique concernant les différents niveaux de comportement. En effet, pour la description de l'architecture globale du fonctionnement du conducteur, nous nous sommes appuyés sur des modèles « cognitivistes » considérant le conducteur comme un système de traitement de l'information. D'un autre côté, dans le Chapitre 2 nous avons apporté des arguments pour montrer que la théorie de la perception directe était particulièrement à même d'expliquer les actions visuellement guidées telles qu'elles sont rencontrées dans la conduite automobile. Par ailleurs, nous ne nous étions pas positionnés concernant les théories les plus à même d'expliquer les comportements plus abstraits (décision, interprétation etc.) car ces questions dépassent le cadre de nos travaux.

Pourtant, l'écart entre ces différentes théories peut sembler suffisamment grand pour ne pas autoriser leur cohabitation conceptuelle ou du moins pour susciter le débat. Premièrement, pour résoudre ce problème il est à notre avis possible d'adopter une posture épistémologique pragmatique. En effet, certaines théories expliquent naturellement mieux des phénomènes particuliers. La théorie « cognitiviste » est plus parcimonieuse pour expliquer les phénomènes analogiques à un processus de manipulation de symboles comme la lecture, l'interprétation d'informations abstraites. En revanche, la théorie de la perception directe requiert moins d'adaptations conceptuelles (i.e., ajout d'hypothèses *ad hoc* difficiles à démontrer, Popper *et al.*, 1973) que la théorie « cognitiviste » pour expliquer le contrôle visuellement

guidé de l'action. Il y a donc un compromis à trouver entre le champ d'application d'une théorie et la puissance explicative de celle-ci.

Nous nous demandons ici, s'il serait possible que la théorie de la perception directe explique d'autres niveaux de comportement que celui des habilités perceptivo-motrices. Dans ce cadre, il nous semble que les réflexions théoriques de la section précédente pourrait nous permettre de répondre par l'affirmative. En effet, nous avons montré qu'affordance et contrôle sont deux notions qui peuvent se définir réciproquement. Autrement dit, que le contrôle de l'action se faisait en fonction des affordances mais que les affordances étaient définies là où le contrôle de l'action était possible. Il nous semble alors qu'il y aurait une place pour une explication théoriquement homogène et parcimonieuse à la fois des habilités perceptivo-motrices et de la prise de décision. Le concept de bifurcation dans un « paysage » d'attracteur-répulseurs serait dans ce contexte un excellent candidat pour expliquer des processus de décision rapide réalisés dans des situations sous fortes contraintes temporelles. Une telle approche théorique pourrait donc fournir un pont entre les premières expérimentations sur la traversée d'intersection (cf., Section 2.1.1) et les nôtres (Chapitres 4, 5 et 6).

8.1.3 Mode de contrôle fondé sur les affordances

Les lois de contrôle telles que proposées par Warren (1988) sont fondées sur le postulat de l'appariement d'un mode d'action et d'une information et de celui de l'annulation de l'erreur (Fajen, 2005c). Selon le premier postulat, le paramètre d'action en sortie de la loi de contrôle est asservi à une information visuelle qui est un invariant spécifiant un état pertinent du système agent-environnement dans la réalisation de la tâche. A chaque état de cette information visuelle, il est ainsi possible d'associer une valeur (et une seule) au paramètre d'action. Il est de ce fait possible de définir un comportement « idéal » en fonction de l'évolution d'une information visuelle. Ce dernier point nous conduit à envisager le second postulat, celui de l'annulation de l'erreur, qui affirme que le comportement réel de l'acteur d'une situation va tendre à réduire l'écart (i.e., l'erreur) entre son comportement réel et le comportement idéal « prescrit » par la loi de contrôle. Ces deux postulats font la force des lois de contrôle car ils en font un outil de compréhension du comportement à la fois parcimonieux et prédictif (i.e., ils prédisent une valeur précise du paramètre d'action). Ils font aussi leur faiblesse car si dans les situations où le comportement est très contraint, la prédiction d'une valeur précise d'un paramètre d'action est plausible (e.g., interception d'une balle), il existe des cas où la marge d'action qui peut être mise en œuvre par l'acteur peut être plus large (e.g., situation comme la nôtre).

A cet égard, Fajen (2005a,b,c) ont proposé un nouveau cadre conceptuel pour l'étude du contrôle de l'action : le modèle de contrôle fondé sur des affordances. Ce modèle tente de contourner les limitations des lois de contrôle classiques en donnant une plus large place aux limites d'action. En effet, il n'est pas nécessaire que le comportement d'un acteur se réduise à l'annulation d'une erreur, il pourrait plutôt être caractérisé par le maintien de l'état du système dans une région sécuritaire. De plus, l'acteur dispose d'une capacité d'action limitée par unité de temps. Ainsi, il n'est pas toujours possible d'annuler l'erreur vis-à-vis du comportement le plus efficient, si les capacités d'actions par unité de temps ne le permettent pas. Prenons l'exemple de la loi de contrôle du freinage fondée sur $\dot{\tau}$ (Warren, 2006)^a. Selon cette loi de contrôle, un conducteur voulant éviter la collision avec un obstacle situé devant lui doit freiner suffisamment pour maintenir $\dot{\tau}$ proche de -0.5 (Lee, 1976). Si l'obstacle est trop proche ou si l'acteur roule trop vite, il ne pourra cependant pas satisfaire cette condition car le freinage du véhicule est limité par

^a $\Delta \text{Accélération} = b(-0.5 - \dot{\tau})$

unité de temps. Ainsi, selon Fajen (2005c,b,a), ce qui compte pour un acteur n'est pas d'annuler l'erreur vis-à-vis d'un comportement idéal mais plutôt de maintenir l'état du système dans une zone sécuritaire en utilisant au mieux ses capacités d'action en les intégrant dans le temps. Pour cet auteur, il se pourrait que les ajustements autour d'une valeur précise de la variable d'action soit liée à des contraintes plus ou moins souples, associées à la situation, et que le comportement d'annulation de l'erreur ne soit qu'un produit de l'ensemble de ces contraintes appliqué dans le champ des comportements possibles.

Ce modèle repose sur une autre notion importante, celle de calibration. En effet, si l'invariant optique spécifie l'état du système agent-environnement à un instant donné, il ne spécifie pas les capacités d'action de l'acteur. L'acteur a donc besoin de connaître ses limites d'action, et selon ce cadre conceptuel, cette connaissance serait constituée par la calibration progressive du système perceptivo-moteur au cours de l'expérience. En fait, l'enjeu de la calibration consiste dans le transfert de l'unité d'origine de l'action requise (e.g., en m/s^2 pour le freinage) en unité propre à l'acteur, c'est-à-dire en unité intrinsèque. Il s'agit ici de l'extension du nombre π proposé dans l'expérience de Warren (1988) sur les marches d'escalier (cf., Section 8.1). En effet, la calibration consiste à rapporter la quantité d'action requise sur l'action maximale possible. Si nous prenons l'exemple du freinage face à un obstacle, il se peut que, en dehors des circonstances particulières (adhérence, vitesse, distance etc.), le freinage requis soit, de façon invariante, de 40% du freinage maximal. Tout l'intérêt de la calibration consiste à permettre à l'acteur de rapporter sa perception de l'action requise à la capacité d'action maximum dans *les circonstances* de l'action.

Utiliser ce type de modélisation pourrait également aboutir à opérationnaliser le concept de FST, les bornes du FST correspondant aux capacités d'action que le véhicule rend disponible au conducteur (i.e., en dehors des limites d'action imposées par l'environnement, comme les obstacles fixes par exemple). Ces aspects dépassaient le cadre de ce travail de thèse mais une suite possible aux présentes recherches consisterait à manipuler expérimentalement les « capacités d'action » du véhicule afin d'étudier le processus de calibration des conducteurs (Fajen, 2005b,a; Basilio *et al.*, 2011).

8.2 Implémentation d'un système d'assistance à la conduite fondée sur les lois de contrôle

Ces discussions théoriques sur les lois de contrôle utilisées par les conducteurs pourraient se traduire dans l'implémentation d'un prototype de système d'assistance à la conduite. En effet, la modélisation du comportement sous forme de lois de contrôle permettrait une description numérique d'un comportement « idéal » que les conducteurs pourraient avoir dans une situation donnée et ainsi leur fournir des informations cruciales pour la réalisation de leur activité.

8.2.1 Les niveaux d'action d'un système d'assistance à la conduite

Il existe plusieurs types de Systèmes d'Assistance à la Conduite (SAC). Ils se différencient par le type de besoin informationnel auquel ils répondent et par le niveau de comportement sur lequel ils agissent (cf., Section 1.1.3). La notion de besoin informationnel est à relier à celle de production de l'erreur dans la réalisation d'une tâche donnée. En effet, l'erreur humaine est désignée comme le facteur principal de défaillance des systèmes à risque (Amalberti, 2001). De façon générale, nous pourrions dire que l'erreur est un écart de comportement par rapport à une « norme ». La notion d'erreur n'est pourtant

pas simple à définir, d'autant que la conduite est une activité peu structurée (Saad, 1987) et que le respect de la réglementation n'est pas *en soi* le critère d'une conduite sécurisée (i.e., l'accident n'est pas le simple produit d'un écart au comportement prescrit par la réglementation). Autrement dit, tout l'enjeu se situe dans la définition d'une « norme », c'est-à-dire dans la définition du comportement *idéal* ou du moins *acceptable* (en terme de sécurité) que devrait avoir le conducteur. De façon générale, une défaillance dans la conduite d'un véhicule peut être cherchée dans la production d'un écart vis-à-vis d'un comportement suffisamment sécuritaire dans une situation donnée. L'une des pistes pour limiter la production d'erreur chez le conducteur est d'agir en amont, c'est-à-dire optimiser la performance du conducteur en lui fournissant des informations. De ce point de vue, la production d'une erreur est conçue comme une défaillance associée à un manque d'informations, ou à une extraction incorrecte de cette information. En d'autres termes, pour chaque type de défaillance (i.e., de situations propices à de mauvaises performances de conduite voire à la production d'un accident), il y aurait un besoin informationnel spécifique à combler (Van Elslande, 2003).

Ainsi, le niveau de comportement sur lequel va agir un SAC dépend du type de défaillance qu'il tente de prévenir et donc de l'information qui doit être fournie au conducteur pour l'assister dans son activité (voire Ahmed, 2001, et ses tableaux de synthèses du projet PROMETHEUS, 1989, 1994). Dans ce contexte, les SAC peuvent agir sur le niveau de comportement dit « stratégique », comme c'est le cas avec les systèmes de calcul d'itinéraires (e.g., Mappy, via Michelin, Google maps) ou le GPS qui permettent d'aider le conducteur dans la planification de son déplacement au niveau le plus global. Ils peuvent agir sur le plan tactique en donnant des informations plus concrètes sur le déroulement du déplacement et aider le conducteur à prendre des décisions ponctuelles (affichages concernant les intempéries, l'état de l'infrastructure ou du trafic). Enfin, il est possible d'agir au niveau opérationnel en influençant le comportement de conduite du conducteur « en ligne », c'est le cas des systèmes d'avertissement d'obstacles ou de suivi de ligne de bord de voie. Il est clair que les informations fournies par les SAC des deux premiers types sont de nature à alimenter des processus cognitifs dits de haut niveau (i.e., ce sont des informations sémantiques concernant la tâche à réaliser), tandis que le dernier type de SAC fournit des informations destinées à des processus cognitifs de bas niveau et qui correspondent au niveau des habilités perceptives et motrices qui nous ont particulièrement intéressées dans ce travail.

8.2.2 Quels apports potentiels de nos travaux dans ce domaine ?

Ce travail nous a conduit à nous intéresser au couplage perceptivo-moteur mis en œuvre par un conducteur automobile en situation de traversée d'intersection. Le type de SAC qui nous intéresse est donc clairement celui agissant sur le niveau des habilités perceptivo-motrices. Dans ce cadre, le besoin informationnel ne porte pas sur des informations sémantiques concernant la réalisation de la tâche en amont mais plutôt un « retour » (i.e., un feedback) informationnel « en ligne » portant sur la performance en temps réel du conducteur. Un système de ce type devrait alors fournir un feedback sensoriel (e.g., sous forme d'indication sonore ou tactile variant en intensité ou en fréquence) qui puisse s'intégrer dans le couplage perceptivo-moteur normal du conducteur et qui lui permettrait d'améliorer sa performance. Ainsi, il a été démontré que l'administration systématique d'un feedback durant la réalisation d'une tâche permet d'augmenter significativement les performances de l'acteur (Salmoni *et al.*, 1984). En outre, il a été montré que les feedbacks pouvaient permettre d'éduquer l'attention en direction d'informations visuelles pertinentes pour la réalisation de la tâche (Huet *et al.*, 2011). Par feedback sur la performance, nous entendons dans notre cas un feedback sur la production d'erreur de conduite comme défini dans la

section précédente. Or, nos travaux vont dans le sens de la définition d'une « norme » de comportement de conduite fondée sur les lois de contrôle. En effet, pour une situation donnée, une loi de contrôle définit à chaque instant le comportement « idéal » que pourrait avoir le conducteur. De même, un modèle de contrôle fondé sur les affordances pourrait définir les limites d'action possibles dans la situation particulière (i.e., un comportement devient une erreur quand il ne permet plus de rester dans la zone de contrôle sécurisée).

Ainsi, tout système qui serait capable de détecter les propriétés pertinentes de l'environnement (contraintes de la tâche) et de l'agent (capacités d'action du véhicule, expertise du conducteur) serait en mesure de calculer la « position » du conducteur dans l'ensemble des actions possibles et de proposer un feedback concernant soit son éloignement d'une position idéale (lois de contrôle classiques), soit son approche des limites d'action (affordance based control). Une schématisation du concept d'un tel dispositif peut être trouvé dans la Figure 8.2.1.

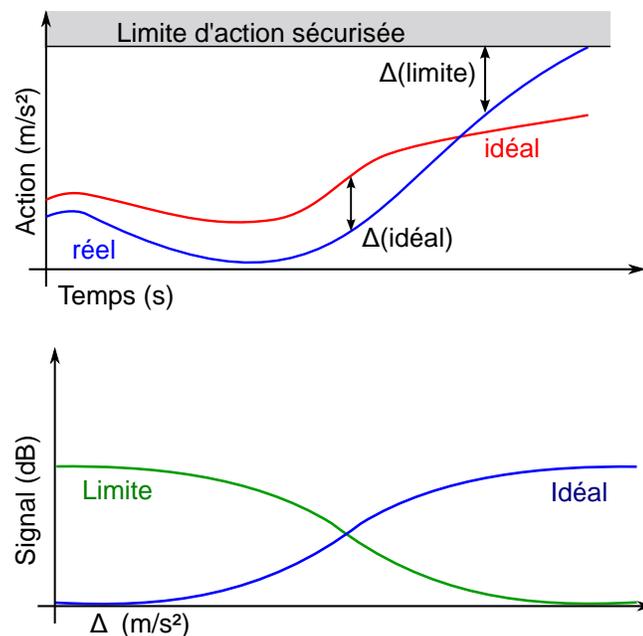


FIGURE 8.2.1 – Principe de fonctionnement d'un SAC fondé sur les lois de contrôle. Panneau supérieur : une modélisation sous forme de loi de contrôle permettrait de calculer la distance entre le comportement réel (ligne bleue) et le comportement idéal prescrit par la loi de contrôle (ligne rouge), tandis qu'une modélisation fondée sur les capacités d'action du conducteur permettrait de calculer la distance du comportement réel aux limites d'action possible pour réussir la tâche (zone grisée). Panneau inférieur : éloignement du comportement réel vis-à-vis du comportement prescrit (ligne bleue) ou rapprochement entre le comportement réel et les limites d'action (ligne verte) pourrait donner lieu à un feedback de plus en plus intense.

8.2.3 Implémentation et études sur simulateur

Un prototype de SAC fondé sur les lois de contrôle pourrait être implémenté dans un simulateur de conduite. Ceci pourrait avoir des conséquences à la fois pratiques et théoriques. D'un point de vue pratique, il serait possible d'implémenter des prototypes de SAC fondés sur différentes lois de contrôle et configurés avec différents paramètres (e.g., modalité sensorielle et fonction de transfert pour le feedback).

Une telle stratégie de recherche permettrait donc de choisir de façon peu onéreuse la meilleure stratégie de contrôle et les meilleurs paramètres pour un SAC. Le meilleur choix pourrait ensuite être implémenté sous forme de prototypes dans un véhicule réel.

D'un point de vue théorique, cette démarche de validation d'un prototype pourrait avoir un impact intéressant concernant l'étude des lois de contrôle dans la conduite automobile. En effet, la réussite relative de SAC fondés sur des stratégies de contrôles différentes pourrait éclairer la question de la loi de contrôle et des informations visuelles pertinentes dans une situation de conduite donnée. Bien qu'heuristique, cette démarche nécessiterait de répondre à de nouvelles questions. Par exemple, le principal défaut des feedbacks est de créer une accoutumance à ce retour informationnel sur la performance. En effet, il a été montré que l'effet des feedbacks était plus élevé quand leur fréquence d'apparition diminuait (Lavery, 1962; Schmidt *et al.*, 1990, 1989) et encore plus quand il était donné « à la demande » (Huet *et al.*, 2009; Camachon *et al.*, 2007). Cet aspect pose la question cruciale, autant théorique qu'appliquée, de l'intégration de l'information retournée en feedback dans le couplage perceptif et moteur.

En effet, il est possible de distinguer le contrôle de l'action dans l'espace perceptif proximal, défini par les variations du feedback lui-même, et son contrôle dans l'espace perceptif distal, défini par les variations des états du système agent-environnement. Autrement dit, dans le premier cas l'information fournie par le feedback n'est pas intégrée dans le couplage perceptivo-moteur de l'acteur car il cherche à annuler la stimulation et non pas à atteindre l'état désiré du système agent-environnement. En revanche, seule une perception distale de l'environnement est révélatrice d'une véritable appropriation d'un outil de perception (Auvray, 2004). Enfin une dernière question qui peut être adressée à ce type de perspective est la pertinence de l'utilisation d'un système de feedback fournissant une information proche de celle utilisée par les conducteurs. En effet, il n'est pas démontré qu'un feedback est d'autant plus pertinent qu'il est proche de l'information utilisée dans une situation sans outils. Bien qu'abstraites, ces questions pourraient en retour améliorer le développement de SAC dans une perspective appliquée.

Chapitre 9

Conclusion

Dans ce travail de thèse nous avons étudié la traversée d'intersection en conduite automobile sous l'angle des actions visuellement guidées : nous l'avons comparée à une tâche d'interception d'une fenêtre se déplaçant horizontalement (fenêtre délimitée par deux bornes physiques que sont ici les véhicules du trafic). Ainsi, nous avons réalisé trois expérimentations sur simulateur de conduite automobile afin de répondre à trois principales questions que nous avons soulevées dans la problématique (cf., Section 2.4) :

1. Est-il pertinent d'étudier la tâche de traversée d'intersection comme une action visuellement guidée ?
2. Quelles informations seraient pertinentes pour le contrôle de l'approche d'une fenêtre inter-véhiculaire à une intersection ?
3. La stratégie de l'angle de relèvement constant peut-elle rendre compte seule du comportement des conducteurs dans cette situation ?

Ce travail nous a permis d'apporter des réponses à ces questionnements. En effet, concernant la première question nous avons mis en évidence un comportement de régulation de la vitesse d'approche qui est à la fois graduel et produit durant toute l'activité de traversée. De tels résultats montrent que les conducteurs éprouvent la nécessité de moduler leur vitesse d'approche de façon continue et adaptée aux contraintes de la tâche, ce qui justifie pleinement notre approche. Concernant la seconde question, nous avons également démontré que les conducteurs contrôlent leur vitesse d'approche sur la base de deux supports informationnels distincts : d'une part une information fondée sur la fenêtre inter-véhiculaire à traverser (dans le but de l'intercepter) et d'autre part sur les véhicules qui forment cette fenêtre (dans le but de les éviter). Ainsi, la tâche de traversée d'intersection à l'intérieur d'une fenêtre se déplaçant horizontalement semble faire appel à deux stratégies perceptivo-motrices complémentaires. Concernant la troisième question, nous avons finalement démontré que la réalisation de cette tâche de traversée ne repose pas exclusivement sur le taux de changement de l'angle de relèvement. Des simulations numériques suggèrent que les régulations opérées par les conducteurs sont compatibles avec celles prédites par la stratégie à angle de relèvement constant sans toutefois en rendre compte de façon complètement satisfaisante. Nous avons de même mis en évidence que les conducteurs utilisent l'expansion optique des véhicules du trafic afin de contrôler leur vitesse, ce qui relativise l'importance de la stratégie à angle de relèvement constant dans notre situation.

Il est clair à l'issu de ce travail que pour traverser une fenêtre se déplacement horizontalement, un agent doit prendre en compte simultanément la contrainte d'interception de la fenêtre libre en mouvement et celle de l'évitement des bornes de cette fenêtre. Ce constat plaide pour l'hypothèse de l'utilisation de deux informations complémentaires (une pour l'interception et une pour l'évitement de collision). Cependant, il n'est pas clair si ces deux informations sont utilisées dans deux stratégies de contrôle distinctes ou si elles sont intégrées dans une seule stratégie composite. Nos travaux suggèrent ici les limites du paradigme des lois de contrôle qui spécifient un comportement "idéal" en fonction d'un paramètre informationnel : l'étude de situation peu contraignantes (i.e., avec une marge de manœuvre étendue) met en évidence que le comportement d'un agent n'est pas strictement orienté vers l'annulation d'une "erreur" par rapport à une valeur "idéal". Ce type de situation pourraient être mieux expliquée par des modèles prenant en compte une zone de comportement sécurisé (cf., le concept de FST de [Gibson et Crooks, 1938](#) et celui de contrôle fondé sur les affordances de [Fajen, 2005c](#)) autorisant une plus grande flexibilité dans le comportement et dont l'utilisation par l'agent pourrait faire appel à différentes informations (i.e., l'informant sur différentes contraintes du système agent-environnement).

Bibliographie

- AHMED, W. B. (2001). Etude de faisabilité de Scénarios-Types d'accidents pour le développement des systèmes de sécurité active embarqués dans les véhicules. Mémoire de D.E.A., École Centrale Paris.
- AMALBERTI, R. (2001). *La conduite de systèmes à risque (2^{Éd.})*. Presses Universitaires de France.
- AUVRAY, M. (2004). *Immersion et perception spatiale : L'exemple des dispositifs de substitution sensorielle*. Thèse de doctorat, École des Hautes Études en Sciences Sociales.
- BARBET, C., MESKALI, M., BERTHELON, C., MOTTET, D. et BOOTSMA, R. J. (2006). Effects of driving experience and age on the detection of upcoming collision. *Le travail humain*, 69(3):209–227.
- BASILIO, N., MORICE, A.H.P., MARTHA, C., BOOTSMA R.J. et MONTAGNE, G. (2011). Interactions entre traits de personnalité et sélection des comportements de dépassement en conduite automobile. *In Actes du XIV^{ème} Congrès International de l'Association des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives*, Rennes, France.
- BASTIN, J., CALVIN, S. et MONTAGNE, G. (2006a). Muscular proprioception contributes to the control of interceptive actions. *Journal of Experimental Psychology : Human perception and Performance*, 32(4):964–972.
- BASTIN, J., CRAIG, C. et MONTAGNE, G. (2006b). Prospective strategies underlie the control of interceptive actions. *Human Movement Science*, 25(6):718–32.
- BASTIN, J., FAJEN, B. R. et MONTAGNE, G. (2010). Controlling speed and direction during interception : an affordance-based approach. *Experimental Brain Research*, 201(4):763–780.
- BASTIN, J., JACOBS, D. M., MORICE, A. H. P., CRAIG, C. et MONTAGNE, G. (2008). Testing the role of expansion in the prospective control of locomotion. *Experimental Brain Research*, 191(3):301–312.
- BENIGUI, N., RIPOLL, H. et BRODERICK, M. P. (2003). Time-to-Contact estimation of accelerated stimuli is based on First-Order information. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 29(6):1083–1101.
- BERTHELON, C., BOCCA, M. L., DENISE, P. et POTTIER, A. (2003). Do zopiclone, zolpidem and flunitrazepam have residual effects on simulated task of collision anticipation? *Journal of Psychopharmacology*, 17(3):324–331.
- BERTHELON, C. et MESTRE, D. (1993). Curvilinear approach to an intersection and visual detection of a collision. *Human Factors*, 35(3):521–534.

- BERTHELON, C., MESTRE, D., POTTIER, A. et PONS, R. (1998). Is visual anticipation of collision during self-motion related to perceptual style? *Acta Psychologica*, 98(1):1–16.
- BOOTSMA, R. (1998). Ecological movement principles and how much information matters. In POST, A., PIJPERS, J., P., B. et BOSCHKER, M., éditeurs : *Models in human movement sciences*, pages 51–63. PrintPartners Ipskamp, Enschede, The Netherlands.
- BOOTSMA, R. J. (1989). Accuracy of perceptual processes subserving different perception–action systems. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 41(3):489–500.
- BOOTSMA, R. J. et CRAIG, C. M. (2002). Global and local contributions to the optical specification of time to contact : Observer sensitivity to composite tau. *Perception*, 31(8):901–924.
- BOOTSMA, R. J., FAYT, V., ZAAL, F. T. et LAURENT, M. (1997). On the information-based regulation of movement : What wann (1996) may want to consider. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 23(4):1282–1289.
- BROOKS, R. (1991). Intelligence without representation. *Artificial intelligence*, 47(1):139–159.
- CAIRD, J. K. et HANCOCK, P. A. (1994). The perception of arrival time for different oncoming vehicles at an intersection. *Ecological Psychology*, 6(2):83–109.
- CAIRD, J. K. et HANCOCK, P. A. (2002). Left turn and gap acceptance crashes. In OLSON, P. et DEWER, E., éditeurs : *Human Factors in Traffic Safety*, pages 613–652. Lawyers & Judges Publishing Company, Tucson, AZ.
- CALJOUW, S. R., VAN DER KAMP, J. et SAVELSBERGH, G. J. P. (2004). Catching optical information for the regulation of timing. *Experimental Brain Research*, 155:427–438.
- CAMACHON, C., JACOBS, D., HUET, M., BUEKERS, M. et MONTAGNE, G. (2007). The role of concurrent feedback in learning to walk through sliding doors. *Ecological Psychology*, 19(4):367–382.
- CHAPMAN, S. (1968). Catching a baseball. *American Journal of Physics*, 36(10):868–870.
- CHARDENON, A., MONTAGNE, G., BUEKERS, M. J. et LAURENT, M. (2002). The visual control of ball interception during human locomotion. *Neuroscience letters*, 334(1):13–16.
- CHARDENON, A., MONTAGNE, G., LAURENT, M. et BOOTSMA, R. J. (2004). The perceptual control of goal-directed locomotion : a common control architecture for interception and navigation? *Experimental Brain Research*, 158(1):100–108.
- CHARDENON, A., MONTAGNE, G., LAURENT, M. et BOOTSMA, R. J. (2005). A robust solution for dealing with environmental changes in intercepting moving balls. *Journal of Motor Behavior*, 37(1):52–62.
- CHIHAK, B. J., PLUMERT, J. M., ZIEMER, C. J., BABU, S., GRECHKIN, T., CREMER, J. F. et KEARNEY, J. K. (2010). Synchronizing self and object movement : How child and adult cyclists intercept moving gaps in a virtual environment. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 36(6):1535–1552.
- CINELLI, M. E., PATLA, A. E. et ALLARD, F. (2009). Behaviour and gaze analyses during a goal-directed locomotor task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(3):483–499.

- CORNUS, S., MONTAGNE, G. et LAURENT, M. (1999). Perception of a stepping-across affordance. *Ecological Psychology*, 11(4):249–268.
- COUTTON-JEAN, C., MESTRE, D. R., GOULON, C. et BOOTSMA, R. J. (2009). The role of edge lines in curve driving. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 12(6):483–493.
- de RUGY, A., MONTAGNE, G., BUEKERS, M. J. et LAURENT, M. (2001). Spatially constrained locomotion under informational conflict. *Behavioural Brain Research*, 123(1):11–15.
- DELUCIA, P. (1991). Pictorial and motion-based information for depth perception. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 17(3):738–780.
- DELUCIA, P. et WARREN, R. (1994). Pictorial and motion-based depth information during active control of self-motion : Size-arrival effects on collision avoidance. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20(4):783–798.
- DEWING, W., DULEY, J. et HANCOCK, P. (1993). The role of vehicle type, velocity and gap size on driver left-turn decisions. In *37th Annual Meeting of the Human Factor Society*, Seattle, WA.
- DUCHON, A. et WARREN, W. (1994). Robot navigation from a gibsonian viewpoint. In *Systems, Man, and Cybernetics. Humans, Information and Technology. IEEE International Conference*, volume 3, pages 2272–2277.
- ESPIE, S. et AUBERLET, J. M. (2007). ARCHISIM : a behavioral multi-actors traffic simulation model for the study of a traffic system including ITS aspects. *International Journal of ITS Research*, 5(1):7–16.
- ESPIE, S. et SAAD, F. (2000). Driver behaviour modelling and traffic simulation. In *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, volume 44, page 251–254.
- FAJEN, B. et MATTHIS, J. (2011). Direct perception of action-scaled affordances : The shrinking gap problem. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 37(5):1442–1457.
- FAJEN, B. R. (2005a). Calibration, information, and control strategies for braking to avoid a collision. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 31(3):480–501.
- FAJEN, B. R. (2005b). Perceiving possibilities for action : on the necessity of calibration and perceptual learning for the visual guidance of action. *Perception*, 34(6):717–740.
- FAJEN, B. R. (2005c). The scaling of information to action in visually guided braking. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 31(5):1107–1123.
- FAJEN, B. R., DIAZ, G. et CRAMER, C. (2011). Reconsidering the role of movement in perceiving Action-Scaled affordances. *Human Movement Science*, 30(3):504–533.
- FAJEN, B. R. et WARREN, W. H. (2003). Behavioral dynamics of steering, obstacle avoidance, and route selection. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 29(2):343–361.
- FAJEN, B. R. et WARREN, W. H. (2004). Visual guidance of intercepting a moving target on foot. *Perception*, 33(6):689–715.
- FAJEN, B. R. et WARREN, W. H. (2007). Behavioral dynamics of intercepting a moving target. *Experimental Brain Research*, 180(2):303–19.

- FITCH, H. et TURVEY, M. (1978). On the control of activity : Some remarks from an ecological point of view. In LANDERS, D. et CHRISTINA, R., éditeurs : *Psychology of motor behavior and sport*, pages 3–35. Human Kinetics Pub, Urbana, IL.
- FODOR, J. (2001). *The mind doesn't work that way : The scope and limits of computational psychology*. The MIT Press, Cambridge, MA.
- FRANÇOIS, M., MORICE, A., BLOUIN, J. et MONTAGNE, G. (2011). Age-related decline in sensory processing for locomotion and interception. *Neuroscience*, 172:366–378.
- GHOSE, K., HORIUCHI, T. K., KRISHNAPRASAD, P. S. et MOSS, C. F. (2006). Echolocating bats use a nearly Time-Optimal strategy to intercept prey. *PLoS Biol*, 4(5):e108.
- GIBSON, J. J. (1977). The theory of affordances. In HAW, R., BRANSFORD, J. et HILLSDALE, N., éditeurs : *Perceiving, acting, and knowing : Toward an ecological psychology*, page 67–82. Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- GIBSON, J. J. (1986). *The ecological approach to visual perception*. Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- GIBSON, J. J. et CROOKS, L. E. (1938). A theoretical Field-Analysis of Automobile-Driving. *The American Journal of Psychology*, 51(3):453–471.
- GRAY, R. (2004). The use and misuse of visual information for “go/nogo” decisions in driving. In *Contemporary issues in traffic research and road user safety*, Hauppauge, NY. Nova Science.
- HANCOCK, P. et MANSTER, M. (1997). Time-to-contact : More than tau alone. *Ecological Psychology*, 9(4):265–297.
- HANCOCK, P. A., CAIRD, J. K., SHEKHAR, S. et VERCRUYSSSEN, M. (1991). Factors Influencing Drivers Left Turn Decisions. In *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*.
- HEUER, H. (1993). Estimates of time to contact based on changing size and changing target vergence. *Perception*, 22(5):549–563.
- HUET, M., CAMACHON, C., FERNANDEZ, L., JACOBS, D. et MONTAGNE, G. (2009). Self-controlled concurrent feedback and the education of attention towards perceptual invariants. *Human Movement Science*, 28(4):450–467.
- HUET, M., JACOBS, D., CAMACHON, C., MISSENARD, O., GRAY, R. et MONTAGNE, G. (2011). The education of attention as explanation of variability of practice effects : Learning the final approach phase in a flight simulator. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 37(6):1841–1854.
- JACOBS, D. et MICHAELS, C. (2006). Lateral interception i : Operative optical variables, attunement, and calibration. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 32(2):443–458.
- JOHANSSON, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 14(2):201–211.
- JUDD, C. M., MCCLELLAND, G. H. et CULHANE, S. E. (1995). Data analysis : Continuing issues in the everyday analysis of psychological data. *Annual Review of Psychology*, 433–465.

- KOSSLYN, S. (1988). Aspects of a cognitive neuroscience of mental imagery. *Science*, 240(4859): 1621–1626.
- KUGLER, P., KELSO, J. et TURVEY, M. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures : I. theoretical lines of convergence. In STELMACH, G. et REQUIN, J., éditeurs : *Tutorials in motor behavior*, pages 3–47. North-Holland, Amsterdam, The Netherlands.
- LANCHESTER, B. et MARK, R. (1975). Pursuit and prediction in the tracking of moving food by a teleost fish (*acanthaluteres spilomelanurus*). *The Journal of Experimental Biology*, 63(3):627–645.
- LAVERY, J. (1962). Retention of simple motor skills as a function of type of knowledge of results. *Canadian Journal of Psychology*, 16(4):300–311.
- LE BRUN, D., BORDIER, J. et LE GUERN, F. (2007). *Nouveau manuel du marin*. Solar, Paris, France.
- LEE, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5(4):437–459.
- LENOIR, M., MUSCH, E., THIERY, E. et SAVELSBERGH, G. J. (2002). Rate of change of angular bearing as the relevant property in a horizontal interception task during locomotion. *Journal of Motor Behavior*, 34(4):385–401.
- LENOIR, M., SAVELSBERGH, G. J., MUSCH, E., THIERY, E., UYTENHOVE, J. et JANSSENS, M. (1999). Intercepting moving objects during self-motion : effects of environmental changes. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 70(4):349–60.
- LOUVETON, N., BOOTSMA, R., GUERRIN, P., BERTHELON, C. et MONTAGNE, G. (2012a). Intersection crossing considered as intercepting a moving traffic gap : effects of task and environmental constraints. *Acta Psychologica*, 141(3):287–294.
- LOUVETON, N., MONTAGNE, G., BERTHELON, C. et BOOTSMA, R. (2012b). Crossing through a dynamical gap : which perceptual features of the gap matter ? *Human Movement Science*, 31(6):1500–1516.
- MANSER, M. P. et HANCOCK, P. A. (1996). Influence of approach angle on estimates of time-to-contact. *Ecological Psychology*, 8(1):71–99.
- MANZANO, J. et BRUSQUE, C. (2007). Les accidents en intersections en rase campagne : analyse bibliographique. Rapport technique, INRETS.
- MCLEOD, P. et DIENES, Z. (1993). Running to catch the ball. *Nature*, 362(6415):23–23.
- MICHAELS, C. F. et CARELLO, C. (1981). *Direct perception*. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
- MICHAELS, C. F., ZEINSTR, E. B. et OUDEJANS, R. R. D. (2001). Information and action in punching a falling ball. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 54:69–93.
- MICHON, J. (1985). A critical view of driver behavior models : What do we know, what should we do. In EVANS, L. et RC, S., éditeurs : *Human behavior and traffic safety*, page 485–520. Plenum Press, New York, NY.
- MOHEBBI, R. et GRAY, R. (2007). Perceptual-motor control strategies for left-turn execution. *Driver Assessment 2007 Proceedings*, page 502–508.

- MONTAGNE, G., BUEKERS, M., CAMACHON, C., RUGY, A. D. et LAURENT, M. (2003). The learning of goal-directed locomotion : A perception-action perspective. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 56(3):551–567.
- MONTAGNE, G., LAURENT, M., DUREY, A. et BOOTSMA, R. (1999). Movement reversals in ball catching. *Experimental Brain Research*, 129(1):87–92.
- MORICE, A. H., FRANÇOIS, M., JACOBS, D. M. et MONTAGNE, G. (2010). Environmental constraints modify the way an interceptive action is controlled. *Experimental Brain Research*, 202(2):397–411.
- NEBOIT, M. (1977). L’analyse psychologique des tâches et la définition des objectifs de la formation. *Cahiers études de ONSER, Bulletin*, 9.
- NEISSER, U. (1967). *Cognitive psychology*. Prentice Hall, New York, NY.
- NI, R. et ANDERSEN, G. J. (2008). Detection of collision events on curved trajectories : Optical information from invariant rate-of-bearing change. *Perception & Psychophysics*, 70(7):1314–1324.
- OLBERG, R. (2011). Visual control of prey-capture flight in dragonflies. *Current Opinion in Neurobiology*, 22(2):267–271.
- OLBERG, R., WORTHINGTON, A. et VENATOR, K. (2000). Prey pursuit and interception in dragonflies. *Journal of Comparative Physiology A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 186(2):155–162.
- ONISR (2007). La sécurité routière en France : bilan de l’année 2007. Rapport technique, ONISR, Paris, France.
- OUDEJANS, R. R., MICHAELS, C. F., BAKKER, F. C. et DAVIDS, K. (1999). Shedding some light on catching in the dark : Perceptual mechanisms for catching fly balls. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 25(2):531–542.
- OUDEJANS, R. R., MICHAELS, C. F., BAKKER, F. C. et DOLNÉ, M. A. (1996a). The relevance of action in perceiving affordances : Perception of catchableness of fly balls. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 22(4):879–891.
- OUDEJANS, R. R., MICHAELS, C. F., van DORT, B. et FRISSEN, E. J. P. (1996b). To cross or not to cross : The effect of locomotion on Street-Crossing behavior. *Ecological Psychology*, 8(3):259–267.
- PAGE, Y. et CHAUVEL, C. (2004). Statistic accident analysis and definition of relevant scenarios. Rapport technique, LAB / PReVENT, Nanterre, Paris.
- PEPER, L., BOOTSMA, R. J., MESTRE, D. R. et BAKKER, F. C. (1994). Catching balls : How to get the hand to the right place at the right time. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20(3):591–612.
- PLUMERT, J., KEARNEY, J., CREMER, J., RECKER, K. et STRUTT, J. (2011). Changes in children’s perception-action tuning over short time scales : Bicycling across traffic-filled intersections in a virtual environment. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(2):322–337.

- PLUMERT, J. M., KEARNEY, J. K. et CREMER, J. F. (2004). Children's perception of gap affordances : Bicycling across traffic-filled intersections in an immersive virtual environment. *Child Development*, 75(4):1243–1253.
- POPPER, K., THYSSEN-RUTTEN, N., DEVAUX, P. et MONOD, J. (1973). *La logique de la découverte scientifique*. Payot, Paris, France.
- RASMUSSEN, J. (1983). Skills, rules, and knowledge ; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions Systems Man Cybernetic*, 13(3):257–266.
- RICHARD, C. (2006). Task analysis of intersection driving scenarios : Information processing bottlenecks. Rapport technique FHWA-HRT-06-033, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- ROSSEL, S., CORLIJA, J. et SCHUSTER, S. (2002). Predicting three-dimensional target motion : How archer fish determine where to catch their dislodged prey. *Journal of Experimental Biology*, 205(21): 3321–3326.
- RUSHTON, S. K. et WANN, J. P. (1999). Weighted combination of size and disparity : a computational model for timing a ball catch. *Nature Neuroscience*, 2(2):186–190.
- SAAD, F. (1987). Analyse et modèle de la tâche de conduite. *L'analyse des comportements et le système de circulation routière. Actes INRETS*.
- SALMONI, A., SCHMIDT, R. et WALTER, C. (1984). Knowledge of results and motor learning : a review and critical reappraisal. *Psychological Bulletin*, 95(3):355—386.
- SALVUCCI, D. D. (2006). Modeling driver behavior in a cognitive architecture. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 48(2):362–380.
- SALVUCCI, D. D., BOER, E. et LIU, A. (2001). Toward an integrated model of driver behavior in cognitive architecture. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1779(1): 9–16.
- SAVELSBERGH, G., WHITING, H. et BOOTSMA, R. (1991). Grasping tau. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 17(2):315.
- SCHIFF, W. (1965). Perception of impending collision : A study of visually directed avoidant behavior. *Psychological Monographs : General and Applied*, 79(11):1–26.
- SCHIFF, W., OLDAK, R. et SHAH, V. (1992). Aging persons' estimates of vehicular motion. *Psychology and Aging*, 7(4):518–525.
- SCHMIDT, R., LANGE, C. et YOUNG, D. (1990). Optimizing summary knowledge of results for skill learning. *Human Movement Science*, 9(3-5):325–348.
- SCHMIDT, R., YOUNG, D., SWINNEN, S. et SHAPIRO, D. (1989). Summary knowledge of results for skill acquisition : support for the guidance hypothesis. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 15(2):352–359.
- SEARLE, J. (1981). Intentionality and method. *the Journal of philosophy*, 78(11):720–733.

- SHANNON, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell system technical journal*, 27.
- SRINIVASAN, M. (1998). Insects as gibsonian animals. *Ecological Psychology*, 10:251–270.
- STAPLIN, L., HARVEY, D., LOCOCO, K. et TARAWNCH, M. (1997). Intersection geometry design and operational guidelines for older drivers and pedestrians. Rapport technique FHWA-RD-96-138, Federal Highway Administration, McLean, VA.
- STEPP, N. et TURVEY, M. (2010). On strong anticipation. *Cognitive Systems Research*, 11(2):148–164.
- TRESILIAN, J. (1991). Empirical and theoretical issues in the perception of time to contact. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 17(3):865–876.
- TRESILIAN, J. (1994). Approximate information sources and perceptual variables in interceptive timing. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20(1):154–173.
- TRESILIAN, J. (1999). Visually timed action : time-out for 'tau'. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(8):301–310.
- TURVEY, M. (1977). Contrasting orientations to the theory of visual information processing. *Psychological Review*, 84(1):67–88.
- TURVEY, M. et SHAW, R. (1979). The primacy of perceiving : An ecological reformulation of perception for understanding memory. In NILSSON, L., éditeur : *Perspectives on memory research*, pages 167–222. Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- TURVEY, M., SHAW, R. et MACE, W. (1978). Issues in the theory of action : Degrees of freedom, coordinative structures and coalitions. In REQUIN, J., éditeur : *Attention and Performance VII*, pages 557–595. Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- VAN DER KAMP, J., SAVELSBERGH, G. et SMEETS, J. (1997). Multiple information sources in interceptive timing. *Human Movement Science*, 16(6):787–821.
- VAN DER MOLEN, H. et BÖTTICHER, A. (1988). A hierarchical risk model for traffic participants. *Ergonomics*, 31(4):537–555.
- VAN ELSLANDE, P. (2001). *Dynamique des connaissances, catégorisation et attentes dans une conduite humaine située : l'exemple des "erreurs accidentelles" en conduite automobile*. Thèse de doctorat, Université Paris V.
- VAN ELSLANDE, P. (2003). Erreurs de conduite et besoins d'aide : une approche accidentologique en ergonomie. *Le Travail Humain*, 66(3):197–224.
- VAN LOON, E., KHASHAWI, F. et UNDERWOOD, G. (2010). Visual strategies used for time-to-arrival judgments in driving. *Perception*, 39(9):1216–1229.
- VON UEXKÜLL, J. (1965). *Mondes animaux et monde humain, suivi de Théorie de la signification*. Gonthier, Paris, France.
- WANN, J. et WILKIE, R. (2004). How do we control high speed steering ? In VAINA, L., BEARDSLEY, S. A. et RUSHTON, S. K., éditeurs : *Optic flow and beyond*, pages 401–419. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

- WARREN, W. (1984). Perceiving affordances : Visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*; *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 10(5):683.
- WARREN, W. H. (1988). Action modes and laws of control for the visual guidance of action. In MELJER, O. G. et ROTH, K., éditeurs : *Complex Movement Behaviour - The Motor-action controversy*, pages 339–379. North-Holland, New York, NY.
- WARREN, W. H. (2006). The dynamics of perception and action. *Psychological Review*, 113(2):358–389.
- WATSON, G., BRAULT, S., KULPA, R., BIDEAU, B., BUTTERFIELD, J. et CRAIG, C. (2011). Judging the “passability” of dynamic gaps in a virtual rugby environment. *Human Movement Science*, 30(5):942–956.
- WILKIE, R. et WANN, J. (2003). Controlling steering and judging heading : Retinal flow, visual direction, and extraretinal information. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 29(2):363–378.
- WILKIE, R. M. et WANN, J. P. (2005). The role of visual and nonvisual information in the control of locomotion. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 31(5):901–911.

Table des figures

1.1.1	Modèle hiérarchique du comportement (adapté de Rasmussen, 1983). Ce schéma fait apparaître une conception du comportement organisé en trois niveaux, allant des activités automatiques et peu coûteuses sur le plan cognitif (habilités) jusqu’aux activités conscientes de prise de décision. Ces trois niveaux de contrôle du comportement s’exécutent simultanément et chacun d’eux prend en entrée un type de donnée approprié (e.g., signaux sensoriels pour les habilités, connaissances sémantiques pour les décisions).	9
2.2.1	Schéma inspiré de Neboit (1977) décrivant le fonctionnement cognitif du conducteur. Nous pouvons constater que le “pivot” de la cognition est constitué par les traitements centraux de haut niveau, tandis que la perception et l’action sont deux processus auxiliaires situés des deux côtés du décours temporel de l’activité.	17
2.2.2	Illustration du FST de Gibson et Crooks (1938). Le conducteur étudié est en bas. La zone qui se “déforme” au passage du véhicule entrant dans l’intersection illustre comment le conducteur pourrait percevoir les trajectoires possibles pour sa traversée.	22
2.2.3	Relations entre les différents éléments conceptuels d’une stratégie perceptivo-motrice. Le contrôle est constitué par l’interaction entre un mode d’action (sélectionné par une affordance), un invariant et un état du système agent-environnement. Ces trois éléments sont “objectivables” c’est-à-dire qu’ils peuvent être mesurés dans la situation étudiée, tandis que la notion d’information ne peut être décrite que relativement à un agent agissant dans son environnement.	23
2.3.1	Cette figure permet de mieux comprendre l’analogie que nous faisons entre la tâche d’interception de mobile et celle de traversée d’intersection. Dans le premier cas (illustration de gauche), un observateur (en bas) marche le long d’une trajectoire rectiligne et va intercepter une cible (balle rouge) qui croise sa trajectoire. Dans le second cas (illustration de droite), un conducteur (voiture du bas) s’approche de l’intersection et va intercepter la fenêtre inter-véhiculaire en déplacement. Dans les deux cas, l’angle de relèvement (angle séparant la trajectoire de déplacement du participant de la position de la cible) noté ϕ . Dans le cas de l’interception d’une fenêtre inter-véhiculaire nous prenons le centre géométrique de la fenêtre comme point référence.	26

2.3.2 Représentation de l'évolution du taux de changement de l'angle de relèvement (panneau de droite) en fonction de différents angles d'approche de la cible (panneau de gauche). Les courbes pleines représentent une arrivée trop précoce de l'agent vis-à-vis de la cible (son avance est constante durant toute la simulation, lui et la cible se déplacent à vitesse constante), tandis que les courbes pointillées représentent une arrivée trop tardive (son retard est constant durant toute la simulation, <i>idem</i>). Nous pouvons observer que quand l'angle d'approche est ouvert (cible bleue) les variations d'angle de relèvement sont plus fortes que quand l'angle d'approche est fermé (cibles verte et rouge) aussi bien en condition d'arrivée précoce que d'arrivée tardive.	27
2.4.1 Niveau de comportement que nous étudions dans ce travail en référence au modèle de Rasmussen (1983).	29
2.4.2 Niveau conceptuel de la théorie de la perception directe que nous étudions dans ce travail.	30
3.1.1 Illustration du simulateur ARCHISIM utilisé dans nos trois expériences (à gauche) et du visuel type présenté aux participants (à droite). Il est demandé aux participants de traverser l'intersection entre les deux véhicules légers rouges.	32
3.1.2 Courbe représentant la capacité d'accélération maximale que le conducteur du véhicule simulé peut obtenir en fonction de sa vitesse instantannée. Cette courbe est obtenue par l'Équation 3.1.1.	34
3.2.1 Schéma représentant les éléments essentiels de la tâche expérimentale. Nous manipulons le point de départ des participants (facteur d'Offset) qui correspond à une position plus ou moins éloignée du point d'intersection. Dans la condition d'Offset nul et à vitesse initiale maintenue constante, le participant croise le point d'intersection en même temps que le centre de la fenêtre inter-véhiculaire. Le point de franchissement projeté représente la position où le participant va croiser la fenêtre (précoce, centrée, tardive) à vitesse maintenue constante en fonction des différents Offsets (précoce, nul, tardif respectivement). Enfin, l'angle d'approche des véhicules du trafic sont aussi manipulés expérimentalement.	35
3.2.2 Illustration de la jauge de contrôle de la vitesse affichée au centre de l'écran à chaque début d'essai. Sur la jauge de gauche le participant roule à une vitesse (rectangle vertical noir) inférieure à la vitesse prescrite (rectangle vertical rouge). Sur la jauge de droite, le participant a amené sa vitesse dans l'intervalle de "tolérance" de la vitesse prescrite.	36
3.2.3 Diagramme représentant le contrôle des événements du scénario expérimental. Une référence aux numéros d'instructions du code ARCHISIM est donnée sous la forme numéro d'instruction + numéro d'essai (E) x 10. Par exemple, l'instruction 4 de l'essai 5 sera numérotée 54 dans le code ARCHISIM du scénario.	37
4.2.1 Illustration of the experimental setting (left panel) and the task's visual rendering as seen by participants (right panel). The task was to cross the intersection using the gap between the two cars.	44

4.2.2 The three different intersection geometries used give rise to three different angle-of-approach conditions. The traffic vehicles move from the left to right and participants from bottom to top. The arrows indicate the angular distance between the participant's trajectory and an oncoming object. For equivalent distances to the intersection this angle is large in the opened angle condition, small in the closed angle condition and intermediate in the perpendicular angle condition. 45

4.2.3 Drivers' future position within the traffic gap if they continue at the initial velocity for gap sizes of 23.5 m (top) and 18.5 m (bottom) and for offsets of -6.25 m (left), 0 m (middle), and +6.25 m (right). 46

4.2.4 Crossing position within the traffic gap as a function of intersection geometry. The gap's centre is represented by zero. 47

4.2.5 Crossing position within the traffic gap as a function of offset for the small (top) and large (bottom) gap sizes. 48

4.2.6 Participants' speed in the three offset conditions as a function of time for the small (left) and large (right) gap sizes. Dashed lines represent maximal speed attainable in 5.5 seconds. 49

4.2.7 Participants' speed in the three offset conditions as a function of time for the closed-angle (left), perpendicular angle (middle) and opened-angle (right) intersection geometries. Dashed lines represent maximal speed attainable in 5.5 seconds. 50

4.2.8 Current deviation in the three offset conditions as a function of time for the small (left) and large (right) gap sizes. Dashed lines represent the inter-vehicular gap's center. 51

4.2.9 Current deviation in the three offset conditions as a function of time for the closed-angle (left), perpendicular angle (middle) and opened-angle (right) intersection geometries. Dashed lines represent the inter-vehicular gap's center. 52

5.2.1 Illustration of the experimental setting (left panel) and the task's visual rendering as presented to the participants (right panel). The task was to cross the intersection using the gap between the two cars. 60

5.2.2 The evolution of the traffic gap's size and speed as a function of the different experimental conditions (see Table 5.2.1 for details of conditions). 64

5.2.3 Gap crossing position as a function of the Offset for the different motion conditions of the Lead Vehicle (left panel) and Trail Vehicle (right panel). 65

5.2.4 Average participant speed in the three Offset conditions as a function time before crossing the intersection. 66

5.2.5 Average participant speed as a function of time before crossing the intersection in the three motion conditions of the Lead Vehicle (left) and the Trail Vehicle (right). 67

5.2.6 Current Deviation as a function of time before crossing the intersection for the three Offset conditions (columns). Panel A presents the LV Motion conditions on different lines and the TV Motion conditions with each subpanel by different symbols. Panel B presents the TV Motion conditions on different lines and the LV Motion conditions within each subpanel by different symbols. 68

5.2.7 Gap crossing position as a function of global changes in gap size (left) and gap speed (right) brought about by LV/TV motion affecting only one or both sides of the gap simultaneously. 70

6.2.1 Simulator and simulated environment: controllers and screens (left panel); road crossing task with the two light vehicles defining the inter-vehicular Gap (right panel).	79
6.2.2 The three different intersection geometries used give rise to three different angle of approach conditions. The traffic vehicles move from the left to right and participants from bottom to top. The arrows indicate the angular distance between the participant's trajectory and an oncoming object. For equivalent distances to the intersection this angle is large in the opened-angle condition, small in the closed angle condition and intermediate in the perpendicular-angle condition.	80
6.2.3 Gap crossing position for Offset x Geometry interaction (left) and for Geometry x Size interaction (right).	83
6.2.4 Overall participants' velocity profiles as a function of Offset conditions.	84
6.2.5 Velocity profiles for Size x Geometry x Time interaction.	84
6.2.6 Current deviation profiles for Size x Geometry x Time interaction.	85
6.2.7 Gap crossing position for Geometry conditions (left) and for Size conditions (right).	86
6.2.8 Velocity profiles for Geometry x Time interaction (left) and Size x Time interaction (right).	87
6.2.9 Current deviation profiles for Size x Geometry x Time interaction.	87
7.1.1 Exemple de modélisation utilisant le modèle CBA avec amortissement (Équation 2.3.7) dans la condition d'Offset nul. La ligne rouge correspond au modèle tandis que la ligne noire correspond au comportement moyen des participants (la zone grise correspond à l'écart-type).	95
8.2.1 Principe de fonctionnement d'un SAC fondé sur les lois de contrôle. Panneau supérieur : une modélisation sous forme de loi de contrôle permettrait de calculer la distance entre le comportement réel (ligne bleue) et le comportement idéal prescrit par la loi de contrôle (ligne rouge), tandis qu'une modélisation fondée sur les capacités d'action du conducteur permettrait de calculer la distance du comportement réel aux limites d'action possible pour réussir la tâche (zone grisée). Panneau inférieur : éloignement du comportement réel vis-à-vis du comportement prescrit (ligne bleue) ou rapprochement entre le comportement réel et les limites d'action (ligne verte) pourrait donner lieu à un feedback de plus en plus intense.	106

Liste des tableaux

5.2.1 Conditions of Lead Vehicle (LV) and Trail vehicle (TV) motion: All the different combinations of Acceleration (Acc in m/s^2), initial velocity (V0 in m/s), and initial distance from the intersection (D0 in m) resulted in a LV and TV speeds of 15 m/s and in an inter-vehicular distance of 35 m at the moment of arrival of the traffic gap centre at the intersection.	61
5.2.2 Matrix of Lead Vehicle (LV) and Trail Vehicle (TV) motion conditions, leading to orthogonal combinations of gap speed and gap size conditions. Constant gap speed is obtained not only by combining constant LV and TV speeds, but also by combining LV acceleration with TV deceleration, and LV deceleration with TV acceleration. Constant gap size is obtained not only by combining constant LV and TV speeds, but also by combining LV acceleration with TV acceleration, and LV deceleration with TV deceleration. Changes in gap speed (increasing or decreasing) or in gap size (expanding or contracting), resulting from the contribution of the lead side, trail side or both sides, are obtained by the other combinations.	63
5.2.3 Orthogonal hypotheses used as predictors of the position of the driver in the traffic gap at the moment of crossing for a nine-conditions experimental design. Positive values refer to a position closer to the LV and negative values refer to a position closer to the TV. . . .	64
C.3.1 Meilleurs paramètres sélectionnés à l'issu de la modélisation pour le modèle CBA simplifié	130
C.3.2 Meilleurs paramètres sélectionnés à l'issu de la modélisation pour le modèle CBA avec amortissement	131

Quatrième partie

Annexes

Annexe A

Disponibilité des données et des codes sources

Les données des trois expériences (ainsi que les codes sources associés^a) sont disponibles^b sous licence [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported License](#) dans un format standard et facilement lisible. Ces fichiers devraient être distribués avec ce document. Si ce n'était pas le cas, contacter l'auteur pour les obtenir.

^aChaque code source est fourni avec sa propre licence et sans aucune garantie concernant leur fonctionnement.

^bSous réserve d'une acceptation pour publication de l'article concerné.

Annexe B

Configuration du modèle de véhicule du simulateur

Le simulateur IFSTTAR utilise un modèle de véhicule (laboratoire CEPA, Strasbourg) dont différents paramètres doivent être configurés. Voici la liste des paramètres utilisés dans nos expériences.

% constante physique

Po = 1.2; % Masse volumique de l'air

% Paramètres moteurs

CMAX = 180; % Couplage max

CRM = 60; % Couple resistance moteur

CTMAX = 150; % Couple transmissible max

JM = .3; % Inertie moteur

CX = .32; % Coef. aerodynamique

FR = 120; % Resistance roulement

MV = 1400; % Masse Vehicule

R = .3; % Rayon de la roue

AF = 1.8; % Aire frontale

% Rapports de boite

RB1 = 15.1;

RB2 = 8.9;

RB3 = 5.8;

RB4 = 0.6;

RB5 = 3.4;

RB6 = 2.9;

RB7 = 2.3;

RB8 = 0.86;

Annexe C

Simulations numériques

C.1 Méthodologie de la modélisation

Pour réaliser une modélisation fondée sur la loi de contrôle CBA (cf., Section 2.3.2), nous avons analysé le comportement moyen des participants sur chaque essai. Pour chacun de ces essais, nous avons fait varier un jeu de coefficients de la loi de contrôle CBA (cf., Équation 2.3.7) que sont k_1 (couplage entre le taux de changement de l'angle de relèvement et l'accélération) et k_2 (force de l'amortissement). Comme la tâche présente différentes « positions » de franchissement possibles à l'intérieur de la fenêtre inter-véhiculaire, nous avons laissé la possibilité au modèle d'intercepter n'importe quel emplacement dans la fenêtre. En intégrant la loi de contrôle au cours du temps avec la fonction ODE45 de MATLAB (R2009b), nous avons pu obtenir pour chaque combinaison de paramètre un modèle de vitesse. Nous avons ensuite comparé la vitesse ainsi obtenue au comportement réel des participants. Cette comparaison (i.e., calcul de la Root Mean Square Error, RMSE) nous a permis de ne conserver que le meilleur « ajustement » de la loi de contrôle aux données. La formalisation de ce algorithme est décrite dans le pseudo-code de l'Algorithme C.1.

Algorithme C.1 Algorithme représentant la méthode de recherche de coefficients optimaux utilisée dans ce travail.

```
C0 <- conditions initiales {positions, vitesses, variables optiques}
Vitesse <- vitesse mesurée dans la condition étudiée
Pour les coefficients {k1, k2, ..., kn} dans {K1, K2, ..., KN}

  Modèle_Vitesse <- Intégrer sur [t0, tfinal]:
    DERIVÉ(Ct) <- LOI_DE_CONTRÔLE(Ct, {k1, k2, ..., kn})
  Erreur <- COMPARER(Modèle_Vitesse, Vitesse)
  Stockage <- EMPILER({k1, k2, ..., kn, Erreur})

Meilleurs_Coefficients <- {k1, k2, ..., kn} pour MINIMUM(Erreur) dans Stockage
```

C.2 Configuration du script de recherche des coefficients

La configuration du programme était la suivante :

```

% Parametres de fit
M = -10;
N = 200;
K1 = -.09:.01:-.01;
K2 = -.09:.0001:-.0001;

% sous echantillonnage en secondes
sous_ech = 0.5;

% Participants et essais a couvrir (-1=tous)
PPS = -1;
ESSAIS = 6;

% espace à couvrir en metres
espace_debut = 0;
espace_total = 35;
espace_bins = 18;
espace_gap = linspace(espace_debut, espace_total, espace_bins);
espace_couvert = 1:18;

% voir une bar de progression
progressbar = 1;

```

C.3 Résultats de la recherche des coefficients

Nous avons réalisé la procédure de modélisation et de recherche des meilleurs coefficients sur les trois modèles : le modèle CBA simplifié (Lenoir *et al.*, 1999), le modèle CBA avec amortissement (Bastin *et al.*, 2008). Les meilleurs paramètres trouvés par l'algorithme C.1 se trouvent dans les tableaux C.3.1, C.3.2, pour les deux modèles respectivement. Pour chaque combinaison de coefficients la colonne "RMSE" représente le calcul de la RMSE tandis que la colonne "R sq." représente le coefficient de détermination (R^2). Les statistiques descriptives associées à la RMSE de chaque modèle peut être trouvées ci-dessous (plus la RMSE est petite et meilleur est l'ajustement).

STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES RMSE :

Modèle CBA simplifié :

Offset Avance :

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
3.679	4.872	5.224	5.508	6.394	7.187

Offset Nul :

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.5044	0.7214	0.9402	1.0290	1.3580	1.4560

Offset Retard :

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
5.249	6.275	7.383	7.237	8.127	9.251

Modèle CBA avec amortissement :

Offset Avance :

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
1.806	1.958	2.038	2.081	2.219	2.435

Offset Nul :

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
1.055	1.216	1.334	1.586	1.683	2.857

Offset Retard :

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
8.241	9.284	9.926	10.360	11.890	12.970

	Participant	Essai	Position	K1	K2	M	N	RMSE	R sq.
1	-1.00	2.00	35.00	-0.07	-0.00	-10.00	200.00	7.19	-0.59
2	-1.00	3.00	35.00	-0.03	-0.00	-10.00	200.00	4.87	0.23
3	-1.00	4.00	35.00	-0.02	-0.00	-10.00	200.00	4.27	0.39
4	-1.00	5.00	35.00	-0.02	-0.00	-10.00	200.00	3.68	0.51
5	-1.00	6.00	35.00	-0.03	-0.00	-10.00	200.00	6.62	-0.29
6	-1.00	7.00	35.00	-0.03	-0.00	-10.00	200.00	5.07	0.10
7	-1.00	8.00	35.00	-0.03	-0.00	-10.00	200.00	6.26	-0.21
8	-1.00	9.00	35.00	-0.03	-0.00	-10.00	200.00	5.22	0.21
9	-1.00	10.00	35.00	-0.02	-0.00	-10.00	200.00	6.39	-0.23
10	-1.00	11.00	0.00	-0.03	-0.00	-10.00	200.00	1.46	0.74
11	-1.00	12.00	0.00	-0.02	-0.00	-10.00	200.00	0.94	0.90
12	-1.00	13.00	0.00	-0.02	-0.00	-10.00	200.00	0.72	0.93
13	-1.00	14.00	0.00	-0.02	-0.00	-10.00	200.00	0.80	0.90
14	-1.00	15.00	0.00	-0.02	-0.00	-10.00	200.00	0.72	0.93
15	-1.00	16.00	10.29	-0.01	-0.00	-10.00	200.00	0.50	0.94
16	-1.00	17.00	12.35	-0.01	-0.00	-10.00	200.00	1.43	0.71
17	-1.00	18.00	10.29	-0.01	-0.00	-10.00	200.00	1.36	0.68
18	-1.00	19.00	12.35	-0.01	-0.00	-10.00	200.00	1.33	0.75
19	-1.00	20.00	0.00	-0.08	-0.00	-10.00	200.00	9.25	-0.63
20	-1.00	21.00	0.00	-0.06	-0.00	-10.00	200.00	7.38	-0.15
21	-1.00	22.00	0.00	-0.06	-0.00	-10.00	200.00	7.40	-0.03
22	-1.00	23.00	0.00	-0.07	-0.00	-10.00	200.00	8.13	-0.45
23	-1.00	24.00	0.00	-0.06	-0.00	-10.00	200.00	6.51	-0.04
24	-1.00	25.00	0.00	-0.06	-0.00	-10.00	200.00	6.27	-0.01
25	-1.00	26.00	0.00	-0.08	-0.00	-10.00	200.00	9.19	-0.85
26	-1.00	27.00	0.00	-0.07	-0.00	-10.00	200.00	5.76	-0.07
27	-1.00	28.00	0.00	-0.06	-0.00	-10.00	200.00	5.25	0.01

TABLE C.3.1 – Meilleurs paramètres sélectionnés à l'issu de la modélisation pour le modèle CBA simplifié

	Participant	Essai	Position	K1	K2	M	N	RMSE	R sq.
1	-1.00	2.00	0.00	-0.01	-0.05	-10.00	200.00	1.99	0.88
2	-1.00	3.00	35.00	-0.01	-0.03	-10.00	200.00	2.04	0.86
3	-1.00	4.00	35.00	-0.01	-0.03	-10.00	200.00	1.81	0.89
4	-1.00	5.00	35.00	-0.01	-0.02	-10.00	200.00	2.31	0.81
5	-1.00	6.00	12.35	-0.01	-0.06	-10.00	200.00	2.10	0.87
6	-1.00	7.00	0.00	-0.02	-0.06	-10.00	200.00	1.87	0.88
7	-1.00	8.00	12.35	-0.01	-0.06	-10.00	200.00	1.96	0.88
8	-1.00	9.00	0.00	-0.01	-0.05	-10.00	200.00	2.44	0.83
9	-1.00	10.00	0.00	-0.03	-0.07	-10.00	200.00	2.22	0.85
10	-1.00	11.00	0.00	-0.04	-0.01	-10.00	200.00	2.86	-0.02
11	-1.00	12.00	0.00	-0.03	-0.01	-10.00	200.00	1.68	0.67
12	-1.00	13.00	0.00	-0.03	-0.01	-10.00	200.00	2.08	0.45
13	-1.00	14.00	0.00	-0.03	-0.01	-10.00	200.00	1.22	0.77
14	-1.00	15.00	0.00	-0.03	-0.01	-10.00	200.00	1.56	0.69
15	-1.00	16.00	0.00	-0.03	-0.01	-10.00	200.00	1.20	0.66
16	-1.00	17.00	0.00	-0.03	-0.01	-10.00	200.00	1.05	0.84
17	-1.00	18.00	6.18	-0.02	-0.01	-10.00	200.00	1.33	0.69
18	-1.00	19.00	0.00	-0.03	-0.01	-10.00	200.00	1.28	0.76
19	-1.00	20.00	0.00	-0.01	-0.01	-10.00	200.00	12.97	-2.21
20	-1.00	21.00	0.00	-0.09	-0.01	-10.00	200.00	10.71	-1.42
21	-1.00	22.00	0.00	-0.09	-0.01	-10.00	200.00	9.50	-0.69
22	-1.00	23.00	0.00	-0.01	-0.01	-10.00	200.00	11.89	-2.11
23	-1.00	24.00	0.00	-0.09	-0.01	-10.00	200.00	9.28	-1.11
24	-1.00	25.00	0.00	-0.09	-0.01	-10.00	200.00	8.24	-0.75
25	-1.00	26.00	0.00	-0.01	-0.01	-10.00	200.00	12.21	-2.27
26	-1.00	27.00	0.00	-0.09	-0.01	-10.00	200.00	9.93	-2.18
27	-1.00	28.00	0.00	-0.09	-0.01	-10.00	200.00	8.54	-1.62

TABLE C.3.2 – Meilleurs paramètres sélectionnés à l’issu de la modélisation pour le modèle CBA avec amortissement

Continuous control of the interception of a moving gap: The case of road crossing at intersection

This Ph.D. project aims at studying drivers' road crossing behaviour under the perspective of visually guided actions. In the introduction, we present that former studies related to road crossing behaviour mainly focused on perceptual judgement processes. However, we demonstrate that this kind of task would be better understood with theories issued from the ecological approach of perception and motor control studies. Our literature review leads us to make a bridge between the task of crossing a road inside a free moving traffic gap and the task of intercepting an horizontally moving target. In this regard, it has been demonstrated that the Constant Bearing Angle strategy (CBA) has a high explanatory power in respect to experimental data. We used driving simulation tools in order to assess the hypothesis of the use of a bearing angle based strategy by drivers. In the first experimental chapter, we show that studying perceptual-motor coupling in this task is relevant and that observed behaviour is close to which observed in horizontally moving target interception tasks. The second experimental chapter demonstrates that drivers' behaviour relies both on visual information related to the moving gap (global contribution) and that related to the independent vehicles (local contributions). In the last experimental chapter, we evidenced that drivers' behaviour does not exclusively rely on the changes of the bearing angle but also on traffic vehicles' optical expansion. We conclude on how our results shed new light on former obtained results with perceptual-judgements based methodology. Finally, we suggest further researches by considering experimental manipulation of drivers' action capabilities and we also consider how our results could be used in order to design driving assistance systems.

Keywords: perception-action, interception, moving gap, road crossing, driving simulator.

Le contrôle de l'interception d'un créneau en mouvement : Le cas de la traversée d'intersection

L'objectif de cette thèse est d'étudier le comportement de traversée d'intersection en conduite automobile sous l'angle des actions visuellement guidées. Dans l'introduction, nous montrons que les principales études portant sur la traversée d'intersection se sont focalisées sur les processus de jugement perceptif; or nous montrons que la compréhension de cette activité pourrait être affinée en utilisant les concepts de la théorie de la perception directe et ceux issus de l'étude du contrôle moteur. Notre revue de questions nous conduit à rapprocher la tâche de traversée d'intersection à l'intérieur d'un créneau libre du trafic à celle d'interception de cible se déplaçant horizontalement. Or, dans le cadre des tâches d'interception, il a été démontré que la stratégie d'angle de relèvement constant (i.e., Constant Bearing Angle, CBA) a un fort pouvoir explicatif vis-à-vis des données expérimentales. Nous avons donc tiré partie des outils de simulation automobile pour tester la plausibilité de l'utilisation d'une telle stratégie par les conducteurs. Dans le premier chapitre expérimental, nous montrons qu'il est légitime d'étudier le couplage perception-action dans ce type de tâche et que les conducteurs adoptent des régulations comportementales proches de celles observées dans une tâche d'interception de mobile. Le second chapitre expérimental nous permet de mettre en évidence l'utilisation conjointe par les conducteurs d'informations relatives au créneau du trafic (supports globaux) et aux véhicules (supports locaux). Enfin, dans le dernier chapitre expérimental, nous mettons en évidence que les conducteurs n'utilisent pas exclusivement le taux de changement de l'angle de relèvement comme information visuelle mais qu'ils utilisent aussi l'expansion optique des véhicules du trafic. Nous concluons ce travail en montrant comment nos résultats nous permettent d'interpréter sous un autre angle ceux obtenus avec une méthodologie fondée uniquement sur les jugements perceptifs. Enfin, nous proposons des perspectives expérimentales en envisageant la manipulation des capacités d'action des conducteurs ainsi que des perspectives appliquées en envisageant l'utilisation de nos résultats dans le contexte de la conception d'un système d'assistance à la conduite.

Mots-clés : perception-action, interception, fenêtre temporelle, intersection, simulateur de conduite.