



Traversée d'intersection et évitement de collision en conduite automobile Identification du support perceptif et des marqueurs du couplage information-mouvement

Julie Mathieu

► To cite this version:

Julie Mathieu. Traversée d'intersection et évitement de collision en conduite automobile Identification du support perceptif et des marqueurs du couplage information-mouvement. Sciences cognitives. Aix-Marseille Université, 2017. Français. NNT : . tel-01652445

HAL Id: tel-01652445

<https://amu.hal.science/tel-01652445>

Submitted on 19 Jan 2018

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

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

UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE

ED 463 - Sciences du Mouvement Humain

Faculté des Sciences du Sport

Institut des Sciences du Mouvement E.-J. Marey. UMR 7287 CNRS & AMU

Thèse de Doctorat*Présentée en vue d'obtenir le grade de docteur en**Sciences du Mouvement Humain**Spécialité : Contrôle Perceptivo-Moteur et Apprentissage***Julie MATHIEU**

**Traversée d'intersection et évitement de
collision en conduite automobile***Identification du support perceptif et des marqueurs du couplage information-
mouvement*

Soutenue le 14 décembre 2017 devant un jury composé de :

J. J. TEMPRADO	Prof. Univ. Aix-Marseille (ISM)	Président du jury
F. MARS	Chargé de Recherche Nantes (CNRS)	Rapporteur
J. NAVARRO	HDR. Univ. Lumière Lyon 2 (EMC)	Rapporteur
C. BERTHELON	DR. IFSTTAR Salon de Provence (LMA)	Directrice de thèse
G. MONTAGNE	Prof. Univ. Aix-Marseille (ISM)	Directeur de thèse

Remerciements

En premier lieu, je souhaite remercier mes directeurs de thèse, Catherine BERTHELON et Gilles MONTAGNE pour la confiance qu'ils m'ont accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral. Merci de m'avoir permis de réaliser cette expérience unique. J'aimerais les remercier également pour leur patience, leurs nombreuses relectures et leurs commentaires qui m'ont permis d'évoluer. Je souhaite également remercier Reinoud BOOTSMA pour son implication dans cette thèse, sa participation à nos réflexions et son aide dans la rédaction des articles.

Je désire exprimer toute ma gratitude aux membres du jury, Jean-Jacques TEMPRADO, Franck MARS et Jordan NAVARRO pour avoir accepté de consacrer du temps à la lecture et à l'expertise de ce travail.

Je remercie l'IFSTTAR et le Conseil Régional pour avoir soutenu et financé cette thèse.

Je me dois également de remercier Eric BERTON, doyen de la Faculté des Sciences du Sport et directeur de l'Institut des Sciences du Mouvement E.-J. MAREY, ainsi qu'à l'ensemble des chercheurs, ingénieurs et doctorants des laboratoires d'accueil (ISM et LMA). Un merci tout particulier à Isabelle AILLERIE (LEPSIS) pour m'avoir formée à la programmation du simulateur de conduite, m'avoir aidée à développer les scénari expérimentaux ainsi que pour son aide pour assurer le bon fonctionnement du simulateur.

Un grand merci à l'ensemble des participants qui ont gentiment accepté de réaliser ces longues expériences sans contrepartie.

Un merci tout particulier à mes amis de bureau, Cécile, Hannah, Alix, Julie et Chloé. Merci également à mes amis parapentistes, en particulier JC, Alban, Fab, Tali, José et Titou pour toutes ces aventures dans nos belles collines, mais également dans les Alpes et à l'autre bout du monde. Ces expériences donnent à la vie une autre dimension. Merci à ma grande et «vieille» amie Julie ainsi qu'à sa famille.

Un grand merci à ma petite famille, ma maman, mon petit frère Hugo, Lulu et Maki pour leur soutien sans faille, leur amour et leur bienveillance.

Pour terminer, je remercie mon fiancé, Erik pour sa curiosité, sa joie de vivre contagieuse et son grain de folie. Merci de tout cœur.

Table des matières

Introduction générale.....	1
1. Cadre général	9
1.1. Importance des véhicules dans notre société	11
1.2. Accidentologie de la conduite automobile	12
1.3. La conduite automobile, une activité complexe	13
1.4. Le cas particulier des intersections	15
1.4.1. Définition.....	15
1.4.2. Accidentologie aux intersections	17
1.4.3. Tâches et paradigmes les plus fréquemment utilisés	18
1.4.4. Les différents facteurs de risque aux intersections.....	21
a. Contraintes liées à la tâche à réaliser.....	21
a.1. Vitesse d'arrivée du/des véhicule(s) croisé(s)	21
a.2. Distance de disparition du véhicule croisé	22
a.3. Temps de disparition du véhicule croisé	23
a.4. Déplacement de l'automobiliste	23
a.5. Conclusion	24
b. Contraintes liées à l'environnement	25
b.1. Géométrie de l'intersection	25
b.3. Caractéristiques du/des véhicules(s) observé(s)	26
b.4. Conclusion	28
c. Contraintes liées au couple conducteur-véhicule	28
1.4.5. Limites du paradigme d'extrapolation du mouvement	30
2. Cadre théorique.....	35
2.1. La traversée d'intersection : quel niveau d'analyse pour étudier cette tâche perceptivo-motrice ?.....	37
2.2. L'approche écologique de la perception et de l'action	39
2.2.1. Le système agent-environnement.....	40
2.2.2. Le couplage perception-action	42
a. Le cycle information-mouvement	44
a.1. Gain en précision en cours d'exécution du mouvement.....	49
a.2. Evolution opposée des patrons de variabilité inter-essais des variables de contrôle et d'ajustement	50
a.3. Métaphore d'un contrôle en forme d'entonnoir	52
b. Le cycle perception-actuation	54

2.3.	Cycle information-mouvement et tâche de traversée d'intersection.....	58
2.3.1.	Paradigme utilisé	59
2.3.2.	Les différents facteurs de risque	62
a.	Contraintes de la tâche à réaliser	62
a.1.	Offset	62
a.2.	Taille de la fenêtre-inter-véhiculaire	64
a.3.	Vitesse d'approche des véhicules croisés.....	65
b.	Contraintes environnementales.....	67
b.1.	Facteur de la géométrie de l'intersection	67
b.2.	Taille des véhicules bornant la fenêtre inter-véhiculaire	68
c.	Contraintes propres au couple conducteur-véhicule.....	69
2.4.	Problématique de ce travail	70
3.	Premier chapitre expérimental : Perception versus Perception-Action	75
4.	Deuxième chapitre expérimental : Les marqueurs du couplage information-mouvement	119
5.	Epilogue	161
5.1.	Principaux résultats	163
5.2.	Synthèse et problématisation	167
5.3.	Perspectives.....	171
5.3.1.	ADAS et comportement de conduite	172
5.3.2.	ADAS et tâche de guidage visuel	173
5.3.3.	Développement d'un ADAS innovant.....	174
5.3.4.	Applications d'un ADAS basé sur un mode perceptif.....	175
	Bibliographie.....	177
	Table des figures.....	191

Avant-propos

Ce travail a fait l'objet de 2 articles soumis dans des revues internationales. Ces travaux seront présentés dans les deux chapitres expérimentaux.

Article 1. Mathieu, J., Bootsma, R.J., Berthelon, C. et Montagne, G. (2017). Judging arrival times of incoming traffic vehicles is not a prerequisite for safely crossing an intersection: Differential effects of vehicle size and type in passive judgment and active driving tasks. *Acta Psychologica*, 173, 1-12.

Article 2. Mathieu, J., Bootsma, R.J., Berthelon, C. et Montagne, G. (2017). Information–movement coupling in the control of driver approach to an intersection. *Ecological Psychology*, 29(4), 317-341.

*"If the doors of perception were cleansed
everything would appear to man as it is, Infinite."*

William Blake (1793). The Marriage of heaven and hell quotes

Introduction Générale

Introduction générale

Le début du Cambrien est l'une des périodes les plus dynamiques de l'histoire de notre planète. Entre 540 et 532 millions d'années avant notre ère, un tournant majeur dans la vie apparaît. Certains organismes pluricellulaires acquièrent la faculté de se déplacer activement dans leur environnement, en parallèle les premières ébauches de systèmes perceptifs tels que le système perceptif visuel naissent. Perception et mouvement semblent indissociables. Au cours de l'évolution, ces êtres vivants subissent une évolution physiologique progressive et développent de multiples stratégies perceptivo-motrices afin de s'adapter aux contraintes de leur environnement ainsi qu'à la niche écologique à laquelle ils appartiennent.

Ainsi, les prédateurs terrestres actuels, du fait de la configuration anatomique de leurs yeux, acquièrent une vision stéréoscopique importante leur permettant d'avoir une très bonne vision de la perspective et de la profondeur. Cela leur permet d'intercepter d'éventuelles proies. A l'inverse les yeux des herbivores sont plus excentrés. Ils ont donc une vision stéréoscopique quasiment inexistante mais cette configuration leur confère une vision plus large afin de percevoir d'éventuels prédateurs autour d'eux.

L'Homme étant omnivore, la sélection darwinienne a favorisé la vision stéréoscopique. Bipède et peu rapide (entre 25 et 33 km/h en sprint en moyenne), l'Homme a éprouvé le désir de se déplacer toujours plus vite et plus loin. Très tôt il a su utiliser des animaux pour le porter ou le tracter (environ 3500 ans avant notre ère). Plus récemment, il a imaginé améliorer le rendement de sa propre énergie physique en inventant la draisienne (1817). A cette époque l'Homme pensait que son corps et sa perception ne lui permettraient

jamais de dépasser la vitesse d'un cheval au galop. Pourtant, au milieu du XIX^{ème} siècle une accélération tout aussi brutale qu'irréversible de la vitesse de déplacement s'est opérée. A l'ère industrielle, le transport mécanique a commencé à employer une énergie autre qu'animale et le vieux rêve « vite et loin » s'est réalisé avec la locomotive (1830), l'automobile et l'aviation (1890). La mobilité s'est trouvée décuplée et a gagné tous les milieux (terrestre, maritime et aérien).

Contrairement aux chemins de fer, moyen de transport collectif, l'automobile est un moyen plus individuel qui a permis à l'Homme de se déplacer d'avantage à sa guise. Cette particularité lui a valu un grand succès et l'automobile s'est très rapidement démocratisée. Grâce à ce nouveau moyen de transport, en 100 ans la distance parcourue par un Américain moyen a été multipliée par 8. En effet en 1914 la distance moyenne parcourue était de 2640 km par an ([Aldcroft, 2012](#)), aujourd'hui un américain possédant une voiture parcourt en moyenne 21700 km par an ([US Department of transport, 2015](#)).

Bien que ce moyen de locomotion présente de nombreux avantages, il est responsable d'environ 1,3 million de décès et de 20 à 50 millions de blessés par an dans le monde. Ces accidents causent des dommages sociaux, physiques, psychologiques et ont un coût financier élevé. Ce coût représenterait 2% du produit national brut dans les pays très motorisés ([Peden et al., 2004](#)). D'après l'OMS la route devrait tuer 2,4 millions de personnes en 2030.

Très tôt le corps scientifique prend conscience de l'importance d'étudier cette activité perceptivo-motrice nouvelle. Dès 1930 un nombre croissant d'études et d'articles sont consacrés à la conduite, aux accidents et à la sécurité des automobilistes ([Heitmann, 2009](#)). De par leur complexité, les tâches de dépassement et de franchissement

d'intersection rassemblent le plus grand nombre d'accidents. En effet, [l'Association National Highway Traffic Safety \(NHTSA\)](#) estime que 40% des accidents de conduite ont eu lieu à une intersection en 2008.

En partant du constat qu'un grand nombre d'accidents en intersection découlent d'une erreur dans la perception des contraintes de la tâche et/ou d'une erreur dans la prise de décision d'initier une manœuvre due à un jugement incorrect de la vitesse ou de la trajectoire d'un véhicule croisé ([Department for Transport, 2010](#) ; [LAB , 2003](#)), un nombre considérable d'études se sont intéressées à la perception des automobilistes. Ainsi de multiples facteurs susceptibles d'affecter le jugement des conducteurs désirant effectuer une manœuvre à une intersection ont été recensés. Jusqu'à présent, très peu d'études référencées se sont intéressées à une compréhension intégrée de l'approche et du franchissement d'intersection prenant en compte les contraintes liées à la tâche à réaliser, les contraintes environnementales et les contraintes liées au conducteur et à son véhicule (e.g., puissance du véhicule conduit, etc.) à travers le cadre de l'approche écologique de la perception et de l'action. Or, comme indiqué précédemment, la perception et l'action semblent indissociables.

Dès lors, tout l'enjeu de ma thèse sera de comprendre les mécanismes perceptivo-moteurs de régulation de l'action lors d'une tâche de traversée d'intersection.

Cette thèse est constituée de trois chapitres. Le premier chapitre aborde la conduite automobile, en particulier la manœuvre de franchissement d'intersection, ainsi que son accidentologie. Nous proposerons par la suite une première revue de littérature sur les études qui ont identifié les différents facteurs à risque susceptibles de modifier la perception des automobilistes et par conséquent, d'augmenter les risques d'accidents aux intersections.

Ces études se sont focalisées sur les processus perceptifs et décisionnels sous-jacents. Or, les actions visuellement guidées, telles que la conduite automobile, impliquent un lien indissociable entre la perception et l'action. Il nous semble, par conséquent, nécessaire de prendre en compte à la fois les processus perceptifs et les processus moteurs afin d'étudier le comportement de conduite des automobilistes lors d'une traversée d'intersection. Ceci nous conduira à aborder notre cadre théorique : l'approche écologique de la perception et de l'action. Dans cette partie, nous aborderons les fondements de cette approche en développant tout particulièrement le couplage entre la prise d'information et le déplacement de l'Homme dans son environnement. Nous proposerons une deuxième revue de littérature sur les études qui ont identifié les différents facteurs de risque susceptibles de modifier le comportement perceptivo-moteur des automobilistes lors d'une traversée d'intersection. Pour clore cette introduction, nous énoncerons la problématique de ce travail.

Le second chapitre de ce manuscrit sera consacré aux trois expériences réalisées lors de cette thèse qui ont donné lieu à deux publications. Nous présenterons dans un premier temps les résultats expérimentaux des deux premières expériences qui ont permis de déterminer si le support perceptif impliqué dans une tâche perceptive et une tâche perceptivo-motrice est identique. Plus précisément, nous avons étudié si la taille et le type de véhicule approchant influençaient les jugements de temps d'arrivée et le comportement des conducteurs traversant activement une intersection. Dans un second temps, nous présenterons les résultats de la troisième expérience qui a permis de déterminer l'influence des capacités d'actions sur les mécanismes de régulation du déplacement lors d'une tâche perceptivo-motrice. Plus précisément nous avons étudié si la capacité d'accélération du

véhicule conduit ainsi que le temps disponible pour réaliser la phase d'approche vers l'intersection influençaient la régulation du déplacement des automobilistes lors de la phase d'approche et de franchissement d'intersection.

Enfin, dans le dernier chapitre nous discuterons les principaux résultats obtenus au cours de ce travail. Nous évoquerons également la contribution théorique de ce travail ainsi que les possibilités d'applications qui sont susceptibles d'en découler.

Cadre Général

1. Cadre général

Au cours de ce chapitre, nous montrerons que dans notre société, l'activité de conduite automobile est devenue quotidienne pour de nombreuses personnes et que l'utilisation massive d'automobiles sur les routes n'est pas sans conséquences. Nous aborderons ensuite les principaux facteurs de risque identifiés par de nombreuses études consacrées à la traversée d'intersection.

1.1. Importance des véhicules dans notre société

« L'importance des routes ne nous apparaît que lorsque nous désirons nous rendre à un lieu et qu'elles n'existent pas ou lorsqu'elles sont momentanément fermées à cause de catastrophes naturelles, de travaux, etc » ([Abrégé de l'histoire des routes de Jean Billard](#)). L'Homme les aurait façonnées au moment de sa sédentarisation au Néolithique, il y a environ 10 000 ans. Elles servent à relier généralement un point d'intérêt à un autre (e.g., deux villes). Aujourd'hui, la route est l'une des infrastructures indispensables à notre société puisqu'elle permet le libre déplacement des Hommes et des marchandises. Ainsi, avec l'augmentation des flux de circulation et le développement des sociétés, les routes se sont multipliées et se sont rencontrées. En 2010 l'ensemble du réseau routier de la planète représentait environ 40 millions de kilomètres et plus d'un milliard de véhicules sont en circulation dans le monde ([Comité des Constructeurs Français d'Automobiles](#)). Aujourd'hui, il y aurait plus d'un véhicule en circulation pour 7 personnes sur la planète. En 2050, au moins 25 millions de kilomètres de nouvelles routes sont prévus ([Laurance et al., 2014](#)) et selon les Nations Unies, le parc automobile mondial devrait atteindre 3 milliards de voitures ce qui reviendrait à un peu moins d'un véhicule pour trois personnes.

Ainsi, la conduite d'un véhicule motorisé devient quasiment indispensable dans notre société. Mais en quoi consiste une tâche de conduite et quels sont les mécanismes utilisés par les conducteurs pour réaliser un déplacement ?

1.2. Accidentologie de la conduite automobile

D'après Deborah A.P. Hersman, présidente et directrice générale de la NSC (National Safety Council), « Conduire une voiture est l'une des activités les plus risquées que n'importe lequel d'entre nous, réalise malgré des décennies d'amélioration de la conception des véhicules et des progrès de la sécurité routière ». En effet, les accidents de la route occupent une place importante dans les statistiques des causes de décès dans le monde.

Une étude américaine de 2016 du [National Safety Council](#) recense les accidents mortels ayant eu lieu aux Etats-Unis et fait ressortir que les accidents de la route apparaissent à la 6^{ème} position des causes de décès, après les maladies cardiovasculaires, le cancer, les maladies chroniques respiratoires, le suicide et les empoisonnements accidentels. Ainsi, un américain aurait un risque sur 113 de mourir en conduisant sa voiture, 1 risque sur 672 de mourir renversé en étant piéton (9^{ème} position) et 1 risque sur 948 de mourir en conduisant une motocyclette (10^{ème} position). En 2015, 38300 personnes ont perdu la vie sur les routes américaines et 4,4 millions ont été grièvement blessées.

D'après le bilan de l'[ONISR](#) (Observatoire national interministériel de sécurité routière), 3 461 personnes auraient perdu la vie la même année sur les routes de France métropolitaine, soit 80 de plus que l'année précédente (+2,4%). D'après une étude

Européenne, environ 68% des accidents mortels seraient dus à une erreur ou à une mauvaise réaction du conducteur (Figure 1.1).

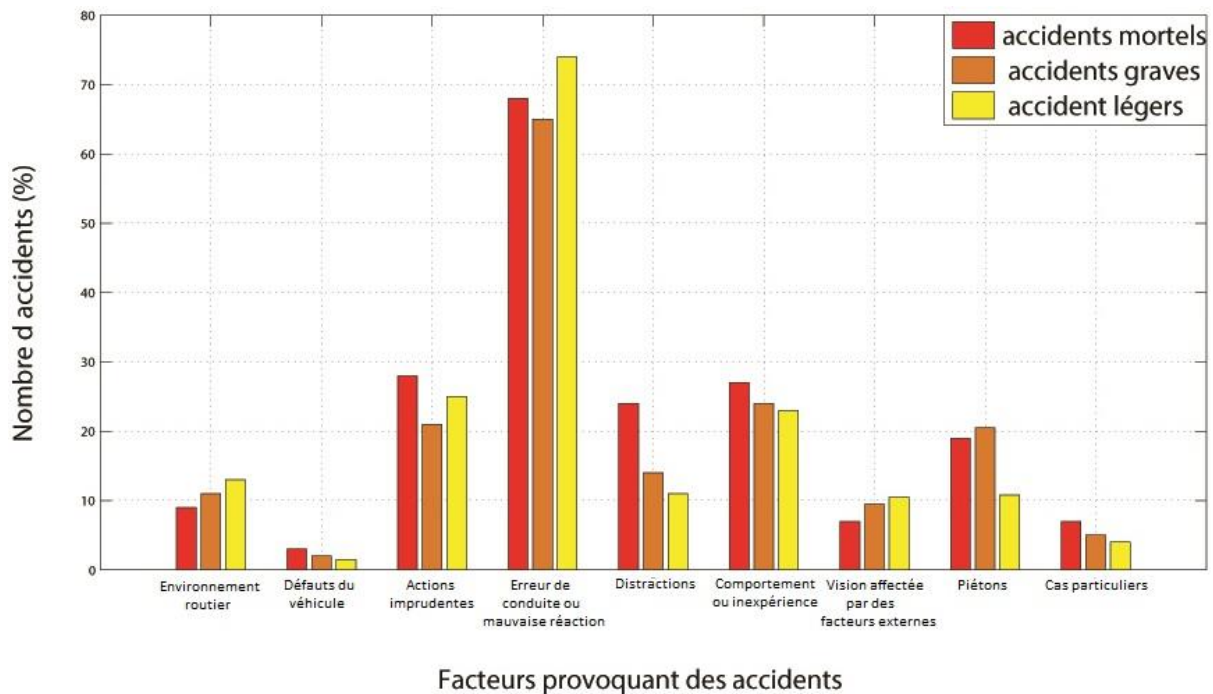


Figure 1. 1 : Facteurs susceptibles d'être à l'origine de l'occurrence d'un accident (i.e., Department for transport, 2011).

1.3. La conduite automobile, une activité complexe

Une description de cette tâche est nécessaire afin d'en comprendre le caractère multidimensionnel. La conduite est en réalité une combinaison de nombreuses sous-tâches de natures très variées et réalisées simultanément. Le conducteur est placé dans un système constitué de lui-même, de son véhicule ainsi que de son environnement routier. Cet environnement routier est lui-même fréquenté par d'autres usagers dont les déplacements doivent être pris en compte pour se déplacer en toute sécurité. Ainsi, en réalisant une tâche de conduite, l'automobiliste prélève des informations sur son véhicule (e.g., vitesse,

position, etc.) et sur son environnement (e.g., autres usagers de la route, intersection, etc.). Il agit sur son véhicule grâce au volant et au pédalier.

En conduite automobile, trois types de tâches essentielles à la réussite de l'action peuvent être recensées : l'identification de risques, la navigation et le guidage (e.g., [Stanton, Young, Walker, Turner & Randle, 2001](#)). L'identification de risques doit être mise en relation avec trois types de dangers : les dangers dynamiques (e.g., les autres usagers de la route), les dangers statiques (e.g., bâtiments, nids de poule, trottoirs) et les dangers sociétaux (e.g., panneaux de signalisation stop, feux rouges). Cette identification des risques aurait des exigences cognitives moins importantes que la tâche de navigation mais aurait une forte exigence temporelle. La tâche de navigation, quant à elle, consiste à déterminer au préalable l'itinéraire entre le point de départ et l'endroit où l'automobiliste désire se rendre. Cette tâche comporterait, à l'inverse de la tâche de guidage, une exigence cognitive importante et aurait peu d'exigence temporelle. Enfin, la tâche de guidage du véhicule se décompose en deux parties : le contrôle longitudinal et le contrôle latéral. Le contrôle longitudinal permet la gestion de la vitesse du véhicule conduit en fonction de l'environnement routier (e.g., arrivée sur une intersection, manque de visibilité), et en fonction des autres usagers de la route (e.g., trajectoire d'un usager susceptible de croiser la route du conducteur). Le contrôle latéral permet de maintenir le véhicule dans sa voie de circulation, bien que certaines manœuvres nécessitent parfois de sortir de celle-ci (e.g., manœuvre de tourner à gauche à une intersection, manœuvre de dépassement). D'après [Michon \(1985\)](#), les tâches de guidage seraient réalisées par le conducteur de façon automatisée, notamment par les conducteurs expérimentés, elles donneraient lieu à peu d'exigences cognitives mais de fortes exigences temporelles.

1.4. Le cas particulier des intersections

1.4.1. Définition

D'après l'[Article R110-2 du code de la route](#) une intersection est définie comme le « lieu de jonction ou de croisement à niveau de deux ou plusieurs chaussées, quels que soient le ou les angles des axes de ces chaussées ». Ces intersections sont généralement aménagées en vue d'éviter les risques de collision, et d'améliorer la fluidité de la circulation. Actuellement on recense de nombreuses intersections routières variant de par le nombre de voies, la géométrie, la signalisation, le type d'utilisateur ou encore la densité du trafic ([Chandler et al., 2013](#)). Ainsi, l'intersection est un espace géographique restreint qui peut être considéré comme une zone de transition dans le déplacement du conducteur ([Saad et al, 1992](#)). Le conducteur effectue généralement à son approche des modifications de son comportement de conduite afin de s'adapter à la signalisation routière ainsi qu'aux autres usagers qu'il est susceptible de rencontrer.

D'après [Page et Chauvel \(2004\)](#), cinq types de manœuvres peuvent être réalisées à une intersection (Figure 1.2). 1) La traversée d'intersection où le conducteur n'est pas prioritaire et ne change pas de direction. Cette manœuvre consiste à cisailer un premier flux de trafic qui circule de la gauche vers la droite du conducteur, puis un second flux qui circule de sa droite vers sa gauche. Dans ce cas, le conducteur n'est donc pas prioritaire. Pour traverser l'intersection le conducteur peut soit s'arrêter, soit réguler sa vitesse afin de s'insérer dans un espace temps (i.e., créneau) suffisant pour ne pas perturber le flux de la circulation venant de sa gauche comme de sa droite. 2) Le franchissement d'intersection où le conducteur est prioritaire et ne change pas de direction. 3) Le tourner à gauche en coupant le flux de véhicules arrivant en face. Cette manœuvre consiste à quitter une voie

prioritaire pour s'insérer dans une voie secondaire. 4) Le tourner à gauche sans être prioritaire qui consiste à quitter une voie secondaire pour s'insérer dans une voie prioritaire. 5) Le tourner à droite à l'intersection.

Bien qu'il y ait eu beaucoup d'efforts réalisés afin d'aménager ce type d'infrastructure, les intersections n'en restent pas moins dangereuses du fait que les trajectoires de nombreux véhicules se rencontrent régulièrement. Cela crée inévitablement des conflits entre les différents véhicules motorisés (e.g, camionnettes, voitures, motocyclettes), entre les véhicules motorisés et les piétons, ou encore entre les véhicules motorisés et les bicyclettes et, chaque année, de multiples collisions sont recensées aussi bien en ville qu'en rase campagne.

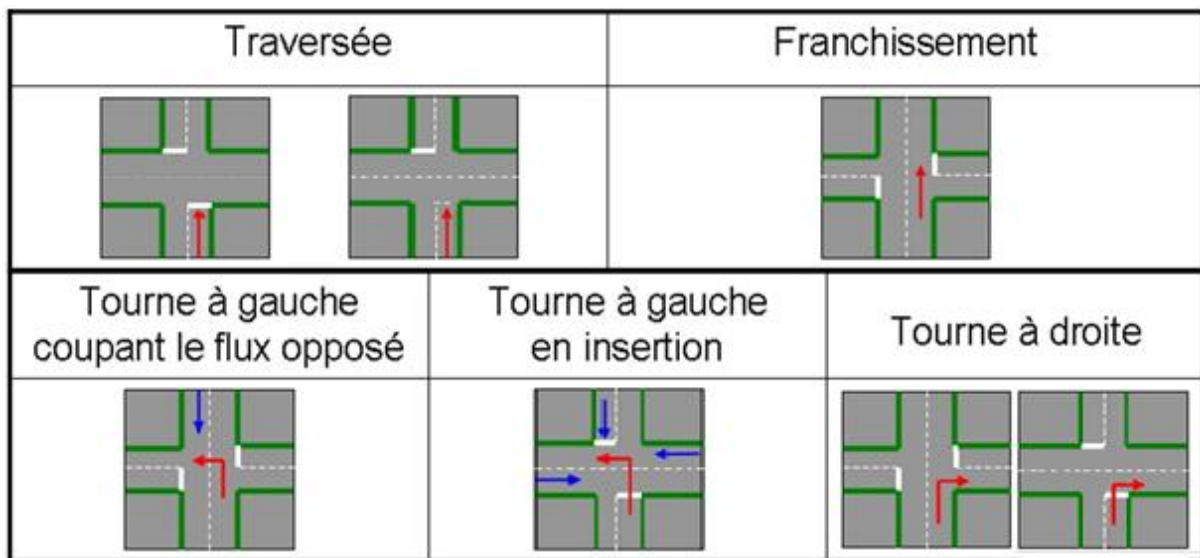


Figure 1. 2 : Les différents types de manœuvres réalisables en intersection (i.e., [Page & Chauvel, 2004](#)). Les flèches rouges représentent le déplacement du conducteur et les flèches bleues représentent le déplacement d'autres véhicules arrivant sur l'intersection.

1.4.2. Accidentologie aux intersections

L'intersection est l'une des infrastructures les plus complexes que les automobilistes, les piétons, les cyclistes et les autres usagers de la route rencontrent quotidiennement. Les accidents aux intersections sont nombreux avec des conséquences souvent graves. Les travaux réalisés par [Page et Chauvel \(2004\)](#) dans le cadre du projet européen PREVENT, ont permis d'identifier les manœuvres les plus accidentogènes au niveau des intersections. On peut constater que les deux manœuvres les plus dangereuses sont la traversée d'intersection où le conducteur n'est pas prioritaire et le tourner à gauche en coupant le flux de véhicules arrivant en face. Ces deux manœuvres sont à l'origine respectivement de 34% et 21% des accidents survenant à une intersection. Dans les deux cas de figure, le deuxième véhicule impliqué dans l'accident effectuait une manœuvre de franchissement d'intersection. Par ailleurs, le tourner à gauche en coupant le flux de véhicules arrivant en face est à l'origine de 12% des accidents. Les accidents liés à une manœuvre de tourne-à-droite sont quant à eux beaucoup moins fréquents et représentent seulement 2% des accidents en intersection.

D'après ces chiffres, les manœuvres de traversée et de franchissement d'intersection sans changement de direction semblent particulièrement difficiles à négocier. Connaître les risques majeurs associés à une collision à une intersection et identifier les différents facteurs susceptibles d'affecter le comportement de conduite des automobilistes pourraient permettre, à l'avenir, d'éviter de nombreux accidents graves.

1.4.3. Tâches et paradigmes les plus fréquemment utilisés

Dans la majeure partie de la littérature en conduite automobile, les auteurs s'accordent à penser que le conducteur doit régulièrement estimer s'il a suffisamment de temps pour effectuer une manœuvre à une intersection pour ne pas entrer en collision avec un autre véhicule du trafic. Comme indiqué dans le paragraphe précédent, les analyses d'accidents suggèrent que le conducteur fait souvent des erreurs de jugement dans cette situation dangereuse. Les enquêtes approfondies de [Larsen et Kines \(2002\)](#) ont également conclu que les principales causes d'accidents étaient liées à un manque d'attention ou à une mauvaise estimation du temps disponible pour réaliser la manœuvre à l'intersection avant que le trafic approchant atteigne l'intersection.

C'est la raison pour laquelle la plus grande partie des études présentes dans la littérature se sont intéressées aux mécanismes perceptifs visuels qui sous-tendent le jugement et le comportement de conduite des automobilistes à une intersection (e.g., [Carel, 1961](#) ; [Schiff & Detwiler, 1979](#) ; [McLeod & Ross, 1983](#) ; [Schiff & Oldak, 1990](#) ; [Hancock, Caird, Shekhar & Vercruyssen, 1991](#) ; [Berthelon & Mestre, 1993](#) ; [Caird & Hancock, 1994](#) ; [Manser & Hancock, 1996](#) ; [Horswill & Wann, 2005](#) ; [Crundall, Humphrey & Clarke, 2008](#) ; [Van Loon, 2010](#) ; [Crundall, Crundall, Clarke & Shaha, 2012](#) ; [Gould, Poulter, Helman & Wann, 2013](#)). Pour étudier ces mécanismes perceptifs, ces études ont utilisé un paradigme d'extrapolation du mouvement (i.e., « *motion extrapolation* » ou « *disappearance methodology* »). Cette méthode expérimentale permettrait de comprendre le comportement de conduite de l'automobiliste par l'intermédiaire d'une tâche de jugement perceptif ([Schiff & Detwiler, 1979](#)). Le plus souvent, dans les expériences utilisant ce paradigme, les participants étaient invités à utiliser un simulateur de conduite ce qui permettait aux chercheurs de pouvoir

contrôler avec précision les différents paramètres expérimentaux. Les conducteurs observaient une scène dans laquelle ils étaient positionnés sur une route, soit à l'arrêt au niveau de l'intersection (e.g., [Caird & Hancock, 1994](#); [Horswill & Wann, 2005](#) ; [Crundall et al., 2008](#) ; [Crundall et al., 2012](#) ; [Gould et al., 2013](#)), soit en mouvement passif vers celle-ci (e.g., [Van Loon, 2010](#) ; [Berthelon & Mestre, 1993](#)). Le plus souvent, un seul véhicule approchait l'intersection face aux participants ou sur leur gauche, sur une route transversale. Avant que le véhicule observé atteigne l'intersection, la scène visuelle était occultée. Dans certaines études le participant devait indiquer si la manœuvre demandée était réalisable (e.g., [Crundall et al., 2008](#)) ou si le véhicule conduit traverserait l'intersection avant, après ou au même moment que le véhicule observé (e.g., [Berthelon & Mestre, 1993](#) ; [Van Loon, 2010](#)). Dans d'autres études, le conducteur devait détecter la présence éventuelle d'un véhicule dans la scène visuelle (e.g., [Crundall et al., 2008](#)) ou l'occurrence d'une manœuvre particulière (e.g., [Gould et al., 2013](#)) suite à une brève exposition à la scène visuelle (e.g., 250 à 500 ms). Enfin dans certains cas, les automobilistes devaient simplement appuyer sur un bouton pour indiquer à quel moment ils pensaient que le véhicule franchissait l'intersection (e.g., [Caird & Hancock, 1994](#)) ou une ligne rouge positionnée devant eux (e.g., [Horswill & Wann, 2005](#)). Dans la plupart des cas, le temps de réponse du participant représentait le jugement perceptif du temps disponible avant l'arrivée du véhicule au niveau de l'intersection. Les participants étaient supposés se représenter l'environnement, plus particulièrement l'évolution de la scène visuelle une fois l'occultation réalisée. Ce temps de pré-contact entre l'objet (e.g., voiture) et le participant est nommé de différentes manières dans la littérature. En effet, nous pouvons rencontrer les termes "time-to-go" (e.g., [Carel, 1961](#)), "time-to-contact" (e.g., [Lee, 1976](#)), "time-to-coincidence" (e.g., [Brown & Groeger, 1988](#)), "time-to-collision" (e.g., [Brown & McFaddon, 1986](#); [Purdy, 1958](#); [Schiff, 1965](#)), "time-

to-arrival” (e.g., Schiff & Oldak, 1990), “arrival time” (e.g., DeLucia, 1991; Schiff & Oldak, 1990) et “time-to-passage” (e.g., Kaiser & Mowafy, 1993). Dans le présent travail, nous utiliserons exclusivement le terme “arrival time” ou temps d’arrivée pour désigner ce temps de pré-contact.

Dans leur ensemble, les résultats de ces différentes études ont montré que les automobilistes avaient tendance à sous-estimer le temps d’arrivée du véhicule observé. En effet, en moyenne ils jugeaient que le temps d’arrivée du véhicule observé était plus court que son temps d’arrivée réel (Figure 1.3). On peut remarquer que malgré la grande diversité des facteurs de risques manipulés dans les différentes expériences, on retrouve toujours cette sous-estimation du temps d’arrivée de la part des automobilistes.

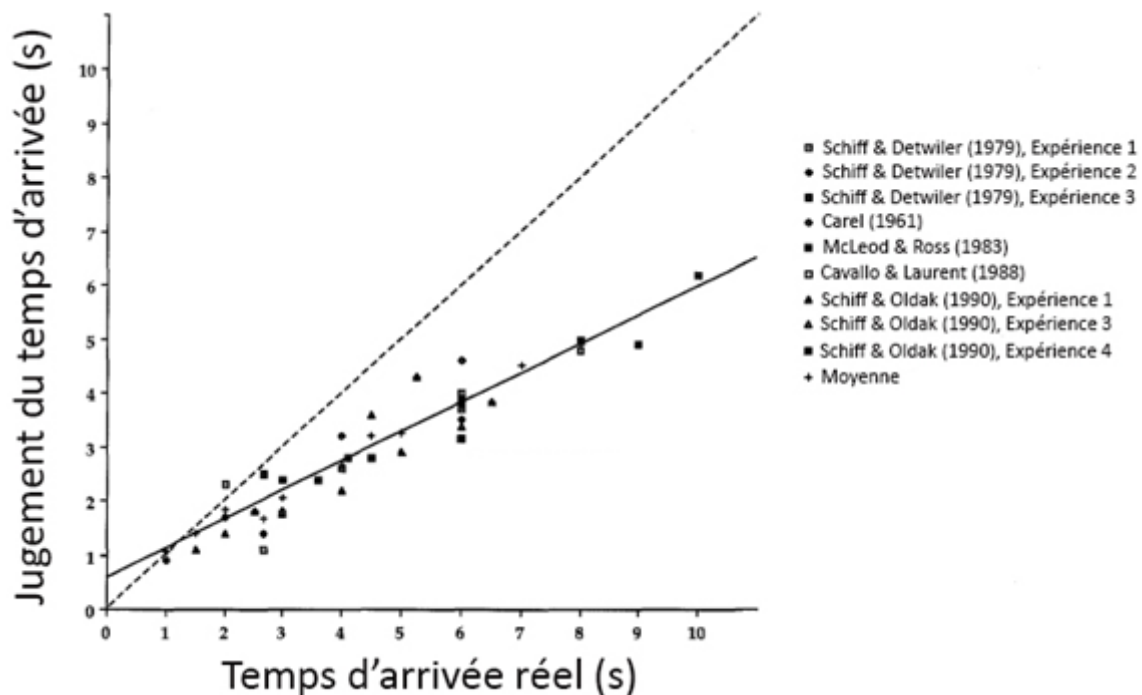


Figure 1. 3 : Jugement du temps d’arrivée d’un objet en fonction du temps d’arrivée réel de celui-ci dans de multiples expériences (i.e., Caird & Hancock, 1994).

1.4.4. Les différents facteurs de risque aux intersections

Les études citées précédemment ont permis d'identifier un nombre important de facteurs susceptibles d'être à l'origine de diverses défaillances humaines lors de la réalisation d'une manœuvre en intersection (e.g., voir [Caird & Hancock \(2002\)](#) pour une revue de littérature exhaustive). Selon ces auteurs, les facteurs de risques aux intersections seraient liés à un triptyque de contraintes liées à la tâche à réaliser, à l'environnement et aux caractéristiques du couple conducteur-véhicule.

a. Contraintes liées à la tâche à réaliser

De nombreuses contraintes spatio-temporelles sont susceptibles d'influencer les jugements des automobilistes. Nous nous sommes, dans un premier temps, particulièrement intéressés dans le présent travail à l'incidence de la vitesse de déplacement, de la distance et du temps de disparition du véhicule observé sur les jugements perceptifs des automobilistes. Dans un second temps nous nous sommes intéressés à l'incidence du déplacement des conducteurs sur l'estimation du temps d'arrivée du véhicule observé.

a.1. Vitesse d'arrivée du/des véhicule(s) croisé(s)

Certains travaux ont étudié l'incidence de la vitesse de déplacement du véhicule observé sur la perception des automobilistes (i.e., [Carel, 1961](#) ; [Schiff & Detwiler, 1979](#) ; [McLeod & Ross, 1983](#) ; [Cavallo & Laurent, 1988](#) ; [Berthelon & Mestre, 1993](#) ; [Dewing, Duley & Hancock, 1993](#) ; [Arnone, 1994](#) ; [Caird & Hancock, 1994](#) ; [Van Loon, 2010](#)). Les résultats indiquaient que plus la vitesse de déplacement du véhicule observé au moment de l'occlusion était importante, plus les participants réalisaient un jugement précis du temps

d'arrivée de ce véhicule à l'intersection (e.g., Schiff & Detwiler, 1979 expérience 1 ; Mc Leod & Ross, 1983 ; Cavallo & Laurent, 1988 ; Figure 1.4a). D'après l'étude de Mc Leod et Ross (1983), la précision de l'estimation du temps d'arrivée du véhicule observé indiquée par les automobilistes augmenterait jusqu'à une vitesse maximale de 80 km/h (Figure 1.4b). Pour les vitesses supérieures à cette valeur, la précision de l'estimation du temps d'arrivée du véhicule observé serait d'environ 70% (figure 1.4b).

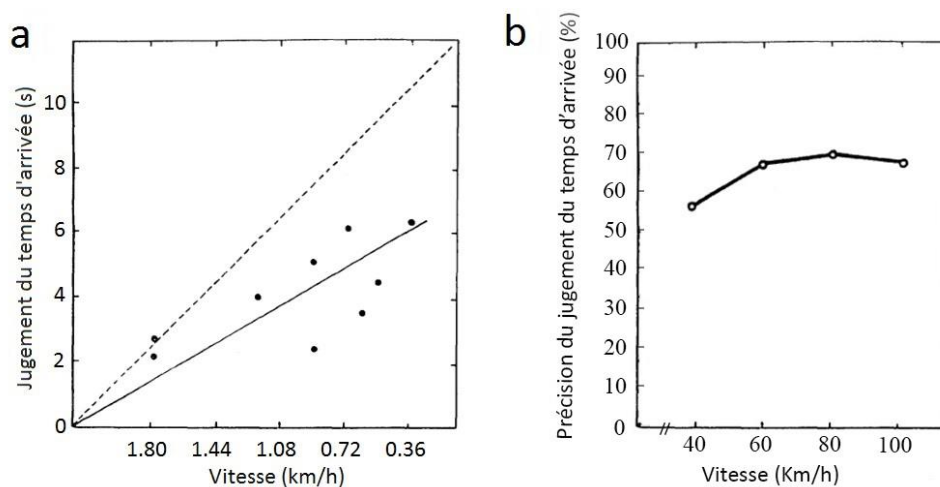


Figure 1. 4 : a) Jugement du temps d'arrivée en fonction de la vitesse de l'objet (i.e., Schiff & Detwiler, 1979 expérience 1). b) Pourcentage de précision du temps d'arrivée du véhicule observé en fonction de sa vitesse (i.e., Mc Leod & Ross, 1983).

a.2. Distance de disparition du véhicule croisé

Toutefois, certaines études présentes dans la littérature semblent indiquer que la vitesse du véhicule croisé aurait une incidence moindre par rapport à d'autres facteurs liés à la tâche à réaliser tels que la distance d'occlusion et le temps de disparition du véhicule observé. Ainsi, plus le véhicule observé était situé loin de l'observateur au moment de la disparition de la scène visuelle plus les automobilistes réalisaient une sous-estimation du temps d'arrivée importante (e.g., Caird & Hancock, 1994 ; Manser & Hancock, 1996). De plus, les expériences de Crundall et al. (2008) indiquaient que pour un temps d'observation

très faible (i.e., 250 ms), plus le véhicule observé était éloigné de l'observateur et plus celui-ci avait des difficultés à percevoir le véhicule arrivant sur l'intersection, notamment si ce dernier était une motocyclette.

a.3. Temps de disparition du véhicule croisé

Le temps de disparition du véhicule croisé représente le temps que met le véhicule à arriver réellement sur l'intersection après la disparition de la scène visuelle. De nombreuses études ont étudié l'incidence de ce facteur en demandant aux automobilistes de réaliser une estimation de ce temps d'arrivée (e.g., [Knowles & Carel, 1958](#) ; [Carel, 1961](#) ; [Carel, 1963](#) ; [Schiff & Detwiler, 1979](#) ; [McLeod & Ross, 1983](#) ; [Cavallo & Laurent, 1988](#) ; [Arnone, 1994](#) ; [Caird & Hancock, 1994](#) ; [Connelly, Conaglen, Parsonson & Isler, 1998](#) ; [Simpson, Johnston & Richardson, 2003](#) ; [Horswill, Helman, Ardiles & Wann, 2005](#)). [Caird et Hancock \(1994\)](#) ont réalisé un graphique superposant les différents résultats obtenus dans de multiples expériences manipulant le temps d'arrivée du véhicule observé dans leurs protocoles expérimentaux (Figure 1.3). Les résultats indiquaient que le temps d'arrivée était d'autant plus sous-estimé que le temps d'arrivée réel du véhicule observé était important.

a.4. Déplacement de l'automobiliste

Enfin, certaines études ont indiqué un effet significatif de la vitesse de déplacement de l'automobiliste sur le jugement du temps d'arrivée d'un véhicule ([Van Loon, 2010, expérience 2](#)). En effet, les conducteurs réalisaient une meilleure estimation du temps d'arrivée du véhicule observé lorsqu'ils avançaient vers l'intersection avec une faible vitesse (i.e., 37.8 km/h) par rapport à une vitesse plus importante (i.e., 52.4 km/h). Le contraire était observé dans les conditions où la route était curviligne. [Cavallo et Laurent \(1988\)](#) ont

également étudié l'incidence de la vitesse de déplacement des automobilistes dans des conditions réelles (i.e., les participants étaient situés sur le siège passager d'une voiture en déplacement). En plus de faire varier la vitesse d'approche en direction d'un objet stationnaire les expérimentateurs ont manipulé l'ouverture du champ visuel des participants. Les résultats de cette étude indiquaient que la précision du jugement du temps d'arrivée était meilleure dans les conditions dans lesquelles la vitesse d'approche était plus élevée (i.e., 90 km/h par rapport à 30 km/h) et dans les conditions dans lesquelles les participants avaient un champ visuel normal par rapport à un champ visuel restreint.

a.5. Conclusion

Ces différents résultats indiquent que le jugement du temps d'arrivée d'un véhicule à une intersection est affecté par de multiples contraintes liées à la tâche à réaliser. Toutefois, les contraintes de vitesse de déplacement, de distance et de temps de disparition ainsi que les contraintes de temps d'arrivée du véhicule observé co-variaient inévitablement. Prenons par exemple deux essais avec un temps d'arrivée identique du véhicule observé à l'intersection après l'occlusion de la scène visuelle. Dans le premier essai la vitesse de déplacement du véhicule observé était plus importante que dans le deuxième essai. Inévitablement, le véhicule du premier essai disparaîtra à une distance plus importante que le véhicule présent dans le deuxième essai. Dans cette situation, la différence de jugement du temps d'arrivée entre les deux essais, était-elle liée au facteur vitesse, au facteur distance de disparition ou à une combinaison de ces deux facteurs ? Par conséquent, il est impossible d'identifier avec précision et certitude l'incidence de chacune de ces contraintes (i.e., vitesse de déplacement, distance de disparition, temps de disparition du véhicule croisé et temps de

présentation de la scène visuelle) sur le jugement de temps d'arrivée émis par les automobilistes.

b. Contraintes liées à l'environnement

Un certain nombre de facteurs environnementaux ayant une incidence directe sur la perception du conducteur ont pu être identifiés. Nous pouvons bien évidemment inclure dans cette catégorie la signalisation routière (e.g., [Johansson & Backlund, 1970](#)), les facteurs météorologiques (e.g., changement d'adhérence de la route étudiée par [Gothie, 2000](#)) ainsi que le type d'environnement routier (e.g., urbain ou rural étudié par [Stevenson & Palamara, 2001](#) ; [Deffenbacher, 2008](#) ; [Keay et al., 2009](#)). Toutefois dans notre revue de littérature, nous nous focaliserons sur l'incidence de la géométrie de l'intersection ainsi que sur les caractéristiques des véhicules que l'automobiliste est amené à rencontrer lors d'un franchissement d'intersection.

b.1. Géométrie de l'intersection

D'après certaines études, la géométrie de l'intersection ainsi que la courbure des routes se croisant à l'intersection sont susceptibles d'influencer la perception des automobilistes, et par conséquent leur comportement de conduite (e.g., [Schiff & Oldak, 1990](#) ; [Van Loon, Khashawi & Underwood, 2010](#) ; [Manser & Hancock, 1996](#) ; [Hancock & Manser, 1997](#) ; [Hesketh & Godley, 2002](#)). Les résultats indiquaient que le conducteur réalisait en moyenne une meilleure estimation du temps d'arrivée des véhicules croisés si la géométrie des routes constituant l'intersection était en angle droit par rapport à un angle obtus (i.e., sous estimation du temps d'arrivée moins importante). Ces résultats semblent indiquer que la perception des automobilistes serait influencée par l'angle d'approche du

véhicule approchant (i.e., anisotropie spatio-temporelle). De plus, la courbure de la route a également une incidence sur le jugement du temps d'arrivée des véhicules croisés (e.g., [Berthelon & Mestre, 1993](#) ; [Van Loon et al., 2010](#)). En effet, les conducteurs réalisaient une meilleure estimation du temps d'arrivée des véhicules sur une route curviligne par rapport à une route rectiligne (i.e., [Van Loon et al., 2010](#)).

b.3. Caractéristiques du/des véhicules(s) observé(s)

Dans la littérature de nombreuses études ont analysé l'incidence de la taille des véhicules croisés sur des tâches de jugement des automobilistes (e.g., [Eberts & MacMillan, 1985](#) ; [Dewing et al., 1993](#) ; [Caird & Hancock, 1994](#) ; [Caird & Hancock, 2002](#) ; [Horswill & Wann, 2005](#) ; [Gould et al., 2013](#) ; [Crundall et al., 2008](#) ; [Crundall et al., 2012](#)). Dans ces études les conducteurs pouvaient croiser des motocyclettes, des voitures et parfois des camionnettes. Les résultats de ces études indiquaient que plus la taille du véhicule observé était importante (e.g., camionnette), plus le participant avait tendance à sous-estimer le temps d'arrivée de ce véhicule sur l'intersection (e.g., [Dewing et al., 1993](#); [Caird & Hancock, 1994](#); [Caird & Hancock, 2002](#); [Horswill et al. , 2005](#)) et à estimer que le véhicule observé est proche de lui (i.e., [Eberts & MacMillan, 1985](#)).

Cependant, dans toutes les études citées ci-dessus (à l'exception d'[Eberts & MacMillan, 1985](#)) la manipulation de la taille du véhicule était directement liée au type de véhicule croisé. Ainsi, la co-variation du facteur taille et du facteur type de véhicule croisé ne permet pas, de distinguer les effets respectifs de chacun des deux facteurs. Il est vrai que, à notre connaissance, très peu d'études se sont intéressées au facteur « type ». De plus, une étude de référence (i.e., [Schiff, 1965](#)) ne révèle aucun effet significatif de ce facteur. En effet,

dans ces travaux l'expérimentateur a étudié les comportements d'évitement de différentes espèces animales (e.g., crabe, grenouille, poule, chat, Homme) en fonction du grossissement et de la forme (i.e., cercles, rectangles, étoiles) d'une ombre projetée au-dessus d'eux. Les résultats montraient les mêmes réactions d'évitement à la menace indépendamment de la forme chez plusieurs espèces, y compris les humains. Toutefois, des travaux récents ont montré que le jugement d'un temps de collision serait en partie affecté par des images ayant des teneurs émotionnelles différentes ([Brendel, De Lucia, Hecht, Stacy & Larsen, 2012](#) ; [Vagnoni, Lourenco & Longo, 2012](#) ; [Brendel, Hecht, De Lucia & Gamer, 2014](#)). Dans ces études les participants devaient estimer le temps de contact entre eux et une image approchant. Cette image pouvait avoir une valence négative (i.e., images menaçantes ou visage en colère), neutre (i.e., personnes, objets, plantes ou visages neutres) ou encore positive (i.e., images érotiques ou visages souriants). Le terme valence désigne la qualité agréable ou désagréable d'un stimulus. Les résultats montraient que les participants sous-estimaient plus fortement le temps d'arrivée d'une image à valence négative qu'une image à valence neutre (i.e., [Brendel et al., 2012](#)). Par contre ils sous-estimaient avec la même intensité un stimulus négatif et positif ayant un degré d'excitation identique. D'après ces auteurs le mécanisme sous-jacent serait l'interaction entre le degré d'excitation et la valence du stimulus observé. En conséquence, le jugement du temps d'arrivée d'un véhicule approchant une intersection est susceptible d'être affecté aussi bien par le facteur taille que le facteur type de véhicule croisé. Il nous semble nécessaire de contrôler indépendamment ces deux facteurs expérimentalement pour lever l'ambiguïté liée à leurs effets respectifs.

b.4. Conclusion

Pour résumer les résultats de ces nombreuses études, nous avons pu voir que la taille et le type de véhicule croisé à une intersection avaient une incidence sur le jugement des automobilistes. En effet, plus le véhicule croisé avait une taille importante plus les conducteurs avaient tendance à sous-estimer son temps d'arrivée sur l'intersection. Toutefois, ces études expérimentales faisaient co-varier le facteur taille et le facteur type de véhicule croisé à l'intersection de telle sorte qu'il était impossible de savoir quel était l'incidence de chacun de ces deux facteurs séparément sur le jugement des automobiles, ce qui, au vu des récents résultats dans la littérature, semble être une faille méthodologique.

c. Contraintes liées au couple conducteur-véhicule

Le jugement du temps d'arrivée du véhicule observé et la prise de décision de réaliser une manœuvre lors de la traversée d'une intersection semblent également différer selon l'âge, l'expérience et le genre des conducteurs. Certaines études montrent également que l'ingestion de psychotropes et de médicaments ont une incidence sur le jugement des participants mais nous ne développerons pas ces résultats dans le présent travail (e.g., [Freydier, Berthelon, Bastien-Toniazzo & Gineyt, 2014](#) ; [Berthelon, Bocca, Denise & Pottier, 2003](#)).

L'âge des automobilistes semblait avoir une incidence sur le comportement de conduite lors de l'approche et du franchissement d'intersection. En effet, les jeunes conducteurs auraient tendance à accepter des marges de sécurité plus faibles que leurs aînés. Par ailleurs, les personnes âgées présenteraient un risque d'accident beaucoup plus élevé lorsqu'ils effectuent une manœuvre en intersection (e.g., [Stamatiadis, Taylor &](#)

McKelvey, 1991 ; Caird & Hancock, 1991). Les études réalisées en fonction de l'expérience de conduite des automobilistes (e.g., Cavallo & Laurent, 1988 ; Berthelon, Mestre & Taramino, 1995) indiquaient que les conducteurs novices avaient tendance à analyser les situations d'intersection moins rapidement que les conducteurs expérimentés. Ils étaient également moins précis dans leur estimation de temps d'arrivée que les conducteurs expérimentés. Pour leur part, les femmes auraient tendance à sous-estimer plus fortement le temps d'arrivée des véhicules croisés sur l'intersection que les hommes (e.g., Mc Leod, 1983 ; Schiff & Oldak, 1990 ; Caird & Hancock, 1994 ; Manser & Hancock, 1996).

Les études précédentes ont identifié de nombreuses contraintes liées au conducteur susceptibles d'influencer l'estimation du temps d'arrivée des véhicules croisés à une intersection et également son comportement de conduite. Ainsi, les contraintes liées à l'automobiliste ont été étudiées dans la littérature mais les contraintes liées au couple conducteur-véhicule sur une tâche de jugement d'un temps d'arrivée ne semblent pas avoir été abordées. A notre connaissance aucune expérience n'a manipulé le facteur capacité d'action (i.e., capacité d'accélération, de freinage et vitesse maximale) pour étudier le jugement du temps d'arrivée d'un véhicule observé à une intersection. Pourtant, Caird et Hancock (1994) mentionnaient l'importance des capacités d'action du véhicule selon les contraintes spatio-temporelles de la manœuvre à réaliser. En effet une manœuvre à une intersection peut être réalisée sans contrainte importante (e.g., absence d'autres usagers de la route) ou elle peut exiger toutes les capacités du véhicule et du conducteur pour l'exécuter (e.g., trafic dense avec peu de distance de sécurité entre chaque véhicule). De plus, les résultats de travaux sur des tâches de prise de décision lors d'une conduite active de son véhicule montraient que les propriétés du véhicule influençaient la sélection d'une

action. En effet une étude sur les manœuvres de dépassement indiquait que plus la vitesse maximale et l'accélération maximale du véhicule étaient élevées plus les automobilistes réalisaient un nombre important de dépassements en ligne droite ([Basilio, Morice, Marti & Montagne, 2015](#)). Une autre étude, cette fois sur les manœuvres de traversée d'intersection, indiquait que la fréquence dans la prise de décision de traverser une intersection augmentait d'autant plus que les capacités de freinage diminuaient ([Marti, Morice & Montagne, 2015](#)). Ainsi les capacités de freinage joueraient un rôle dans la sélection d'un mode d'action lors d'une tâche de franchissement d'intersection.

1.4.5. Limites du paradigme d'extrapolation du mouvement

Ces études ont permis de mettre en évidence de multiples facteurs affectant les jugements perceptifs des automobilistes. Ceux-ci peuvent être classés en trois grandes catégories de contraintes : les contraintes liées à la tâche à réaliser, les contraintes liées à l'environnement et les contraintes liées au couple conducteur-véhicule. Cependant nous pourrions nous demander si un paradigme d'extrapolation du mouvement est la méthode la plus adaptée pour étudier le comportement de conduite des automobilistes à l'approche d'une intersection. En effet, d'après ces études ce comportement pourrait être étudié grâce à des jugements de temps d'arrivée des véhicules présents dans la scène visuelle. Or, comme nous avons pu le voir, la conduite est une tâche complexe et le guidage visuel serait un processus impliquant un lien étroit entre les informations présentes dans l'environnement et les mouvements de l'Homme (e.g., [Warren, 1988](#) ; [Bootsma, 1989](#)).

Une discussion sur le paradigme d'extrapolation du mouvement peut être trouvée dans l'étude de [Caird et Hancock \(1994\)](#). Dans la plupart des études réalisées, il était le plus

souvent demandé aux participants d'appuyer sur un bouton pour indiquer à quel moment le véhicule observé les aurait atteints si celui-ci avait maintenu la même vitesse d'approche après la disparition de la scène visuelle. Le résultat le plus redondant qui ressort des études utilisant un paradigme d'extrapolation du mouvement est la sous-estimation systématique du temps d'arrivée du véhicule observé. De ce fait, [Stoffregen et Riccio \(1990\)](#) estimaient que cette sous-estimation systématique pourrait indiquer l'instant où l'automobiliste aurait commencé à réaliser une manœuvre d'évitement afin d'éviter le véhicule arrivant sur eux. Avec ce type de paradigme nous ne pouvons pas savoir avec certitude si la réponse des participants était une réelle estimation du temps d'arrivée du véhicule approchant l'intersection ou si cette réponse traduisait l'initiation d'un déplacement afin d'éviter une éventuelle collision.

Un autre problème a été soulevé dans la revue de littérature de [Caird et Hancock \(1994\)](#). En effet, le plus souvent les expériences utilisant un paradigme d'extrapolation du mouvement présentaient un seul véhicule dans l'environnement visuel des participants (e.g., [Caird & Hancock, 1994](#) ; [Horswill & Wann, 2005](#) ; [Van Loon et al., 2010](#) ; [Crundall et al., 2008](#)). Or, toute la difficulté de réaliser une manœuvre à une intersection serait liée aux contraintes spatio-temporelles de cette tâche (i.e., temps disponible entre deux véhicules afin de réaliser la manœuvre sans risque de collision). Ici, en présence d'un seul véhicule les contraintes spatio-temporelles et les risques de collision sont très faibles.

D'autre part, les résultats des études utilisant un paradigme d'extrapolation du mouvement (e.g., [Schiff & Detwiler, 1979](#) ; [Caird & Hancock, 1994](#)) comportaient certaines incohérences en comparaison avec les études dans lesquelles les participants devaient réaliser l'action dans son intégralité. Pour réussir une action telle qu'une manœuvre de

traversée d'intersection, les automobilistes ne doivent pas déterminer avec exactitude à quel moment ils réaliseront la manœuvre mais plutôt coordonner plusieurs actions comme pour une tâche de frappe de balle (e.g., [Lee, Young, Reddish, Lough & Clayton, 1983](#)). En effet, les travaux de [Gray et Regan \(2005\)](#) indiquaient que, pour une tâche de prise de décision d'effectuer ou non un dépassement, les résultats étaient différents en fonction de la nature de la tâche à réaliser. Dans cette étude les participants étaient installés dans un simulateur de conduite automobile et devaient réaliser une tâche de suivi de véhicule. Ils conduisaient sur une ligne droite de 4000 m à la vitesse qu'ils voulaient en restant sur la voie de droite. Lorsqu'ils entendaient un stimulus sonore, ils devaient effectuer une manœuvre de dépassement (Figure 1.5a). A l'instant où cette stimulation sonore retentissait, un véhicule venant d'en face apparaissait. Si les participants estimaient pouvoir effectuer un dépassement en sécurité ou non, ils dépassaient le véhicule situé devant eux avant, ou après le véhicule arrivant en face. Dans la moitié de l'expérience les participants devaient appuyer sur un bouton s'ils estimaient pouvoir effectuer la manœuvre de dépassement en toute sécurité (i.e., l'appui sur le bouton entraînait la disparition de la scène visuelle et un autre essai était présenté) et dans l'autre moitié les participants réalisaient activement le dépassement s'ils estimaient pouvoir effectuer la manœuvre de dépassement en toute sécurité. Les résultats de cette expérience indiquaient que les participants avaient tendance à estimer qu'une manœuvre de dépassement était réalisable alors que celle-ci était dangereuse. Les résultats étaient bien différents pour les conditions dans lesquelles les participants devaient réaliser activement un dépassement de véhicule. En effet, les conducteurs réalisaient moins de dépassements dangereux (Figure 1.5b).

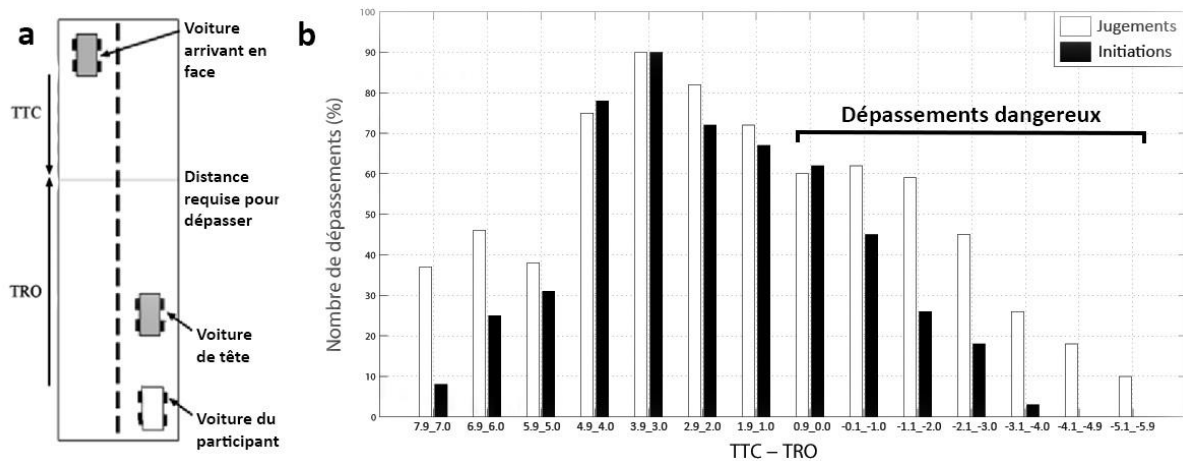


Figure 1.5 : a) Calcul de la marge de sécurité pour les manœuvres de dépassement. Le temps requis pour que le conducteur dépasse (TRO) a ensuite été comparé au temps requis pour que la voiture arrivant d'en face atteigne cette distance critique (TTC). b) Résultats en pourcentage du nombre de jugements positifs et du nombre d'initiations d'une manœuvre de dépassement pour différentes gammes de valeur de TTC-TRO (i.e., [Gray & Regan, 2005](#)).

Enfin, la plupart des études utilisant un paradigme d'extrapolation du mouvement plaçaient l'automobiliste à l'arrêt au niveau de l'intersection. [Oudejans et al. \(1996\)](#) se sont intéressés à des jugements portant sur le caractère « traversable » d'une route selon que les piétons étaient arrêtés ou en mouvement au moment de l'estimation. 760 traversées de piétons ont été analysées et classées en quatre catégories (i.e., piéton arrêté qui traverse, piéton arrêté qui ne traverse pas, piéton en déplacement qui traverse et piéton en déplacement qui ne traverse pas). Les résultats indiquaient que les piétons en mouvement traversaient la chaussée plus aisément que les piétons en position stationnaire sur le bord du trottoir. Ces résultats semblent indiquer qu'un piéton en mouvement analyserait plus facilement le rapport entre le temps disponible entre le passage de deux véhicules et le temps disponible pour traverser la route. De plus le mouvement créé par la marche améliorerait la perception des distances (e.g., [Bingham & Stassen, 1994](#)).

En résumé, les résultats de nombreuses études semblent lister de multiples problèmes liés à l'utilisation d'un paradigme d'extrapolation du mouvement. En effet, les principaux problèmes soulevés au cours de cette revue de littérature sont de ne pas savoir à quoi correspond l'estimation du temps d'arrivée du véhicule observé (i.e., temps d'arrivée du véhicule ou début d'une manœuvre d'évitement), le manque de contraintes spatio-temporelles (e.g., présence d'un seul véhicule dans l'environnement), l'absence de réalisation de la manœuvre et également l'absence de déplacement des automobilistes en direction de l'intersection. Les différents problèmes soulevés renforcent la nécessité de maintenir le lien naturel entre la perception et l'action pour étudier les mécanismes sous-jacents du contrôle de l'action orientée vers un but. Suite à ces constatations, l'approche Ecologique de la perception et de l'action semble fournir un cadre pertinent pour étudier le comportement perceptivo-moteur des automobilistes lors d'une approche et d'une traversée d'intersection.

***Cadre
Théorique***

2. Cadre théorique

2.1. La traversée d'intersection : quel niveau d'analyse pour étudier cette tâche perceptivo-motrice ?

La traversée d'intersection est une tâche perceptivo-motrice complexe. D'un point de vue général, la notion de complexité doit être appréhendée à la fois par une approche holistique et par une approche systémique. Ainsi, l'interaction de multiples éléments produit des émergences, permettant au système complexe de développer des propriétés spécifiques que l'on ne peut pas déduire à partir de la connaissance du fonctionnement de chacun des éléments qui le constituent. [Edgar Morin \(1995\)](#) le résume très bien dans la phrase suivante : « Quand je parle de complexité, je me réfère au sens latin élémentaire du mot complexus, ce qui est tissé ensemble. Les constituants sont différents, mais il faut voir comme dans une tapisserie la figure d'ensemble ». La résolution d'un système complexe passe par un changement de niveau de description pour révéler l'émergence de nouvelles propriétés ([Schéma Stratégique du CNRS, 2002](#)). En d'autres termes, plusieurs niveaux d'analyse spatio-temporels peuvent être utilisés pour réaliser des études (e.g., micro, meso, macro pour le niveau spatial et de la nanoseconde au siècle pour le niveau temporel).

En 1979, [James J. Gibson](#) fait part de l'état de sa réflexion à propos des systèmes perceptifs. Pour lui, la vision est quelque chose de fascinant et mystérieux. Pour la comprendre il a étudié la physique, l'optique, l'anatomie. Il pensait qu'en mettant en relation des connaissances provenant de champs disciplinaires distincts une théorie de la perception émergerait et qu'il pourrait la soumettre au test de l'expérimentation. Mais plus il comprenait le fonctionnement de l'œil et du cerveau plus les énigmes s'approfondissaient.

Il comprit alors que « Les experts en optique connaissaient la lumière comme radiation, mais non comme illumination. Les anatomistes connaissaient l'œil comme organe mais ne savaient pas ce qu'il pouvait faire. Leurs savoirs étaient inutiles. Ils pouvaient créer des hologrammes, prescrire des lunettes, et guérir des maladies oculaires – et ce sont là de brillantes réussites – pourtant, ils ne pouvaient expliquer la vision » (i.e., [Gibson, 1979](#)). Pour cela il est important de bien définir le niveau de description auquel on se réfère pour réaliser des études sur la perception.

Pour étudier une tâche de traversée d'intersection, il faut étudier le système dans son intégralité afin de pouvoir comprendre le comportement spécifique de l'automobiliste. Dans le cas d'une traversée d'intersection, le système complexe étudié serait composé de trois principaux éléments : le conducteur, son véhicule et son environnement. Chaque élément est lui-même constitué de multiples éléments (e.g., système nerveux, muscles, etc. pour le conducteur ; volant, moteur, etc. pour la voiture ; route, voitures, etc. pour l'environnement), qui eux-mêmes sont composés de nombreux éléments, etc. Nous avons choisi pour observer au mieux les comportements produits d'utiliser une échelle de grandeur significative pour l'Homme englobant le système dans son ensemble, ainsi qu'une échelle temporelle adaptée à la tâche que le conducteur doit réaliser, qui est de quelques secondes.

Pour cela l'approche Ecologique de la perception et de l'action paraît être une bonne candidate, car elle a pour objet l'étude des interrelations établies entre les organismes vivants et les milieux dans lesquels ils évoluent. Le paradigme écologique s'intéresse au contrôle perceptif du déplacement. Ce cadre théorique a pour but d'identifier les

mécanismes qui sous-tendent la production d'une action à partir des relations qui s'établissent entre l'agent (e.g., le conducteur) et l'environnement.

2.2. L'approche écologique de la perception et de l'action

La vision est, chez l'Homme, l'un des sens les plus utilisés pour percevoir l'environnement. Gibson est l'un des plus grands psychologues du 20^{ème} siècle ayant étudié la perception. Durant sa carrière il s'est opposé aux courants dominants dans cette discipline, le béhaviorisme et le cognitivisme. Le béhaviorisme réduit le comportement à une fonction corporelle d'adaptation selon un mécanisme défini par deux modèles distincts. Le premier serait le modèle stimulus-réponse, également appelé comportement répondant (e.g., [Watson, 1958](#) ; [Pavlov, 2003](#)). Le deuxième serait le modèle stimulus-réponse-conséquence plus connu sous le nom de conditionnement opérant (e.g., [Skinner, 1938](#)). Cette approche étudie uniquement le comportement « manifeste » humain ou animal en délaissant les activités cérébrales de ceux-ci. L'approche cognitive, quant à elle, s'est particulièrement intéressée au traitement de l'information. Elle postule l'existence de représentations mentales qui seraient stockées dans la mémoire à long terme et qui déclencheraient, piloteraient et corrigeraient le mouvement au cours de sa réalisation (e.g., [Schmidt & Debû, 1993](#)). Ainsi l'Homme ou l'animal prélèverait dans son environnement divers indices visuels qui seraient analysés et regroupés afin de construire un modèle tridimensionnel du monde lui permettant de planifier son déplacement. Ces théories reposaient sur un double dualisme agent-environnement et perception-action. L'approche de la perception et de l'action de [Gibson \(1979\)](#) se veut en rupture avec le béhaviorisme ou le cognitivisme. Elle fournit une alternative complète à ces courants psychologiques de la perception en remettant en cause la pertinence d'une perception indirecte de

l'environnement. Selon elle, l'information délivrée par la lumière ambiante est plus riche que ne le supposent les précédents théoriciens. Gibson rejetait le double dualisme agent-environnement et information-mouvement et lui opposait les notions de système agent-environnement et de couplage perception-action.

2.2.1. Le système agent-environnement

Selon Gibson, on ne peut expliquer la perception que dans les relations mutuelles entretenues par l'animal et l'environnement dans lequel il évolue (Gibson, 1979). L'approche écologique se distingue des autres car elle place la relation de réciprocité entre l'agent et l'environnement au centre de la réflexion. L'agent est un terme qui désigne les organismes capables de percevoir et de se déplacer (e.g., animaux, Hommes ou robots bio-inspirés). L'environnement est le monde qui entoure un agent. Un environnement ne peut être considéré qu'en relation avec un agent. En effet, ce qui entoure un objet inanimé n'est pas considéré comme étant un environnement. Non seulement le comportement de l'agent naît des interactions qu'il entretient avec son environnement, mais ce dernier a également conditionné le développement de l'agent. Un grand nombre d'animaux ont par exemple acquis un système visuel car la lumière est présente dans leur environnement. Dans les environnements dans lesquels la lumière est absente, tels que les milieux souterrains ou les profondeurs sous-marines, les animaux ne développent aucune forme de système visuel ou celui-ci s'atrophie (e.g., l'*Astyanax Mexicanus*).

Ainsi, l'agent et l'environnement forment un couple indissociable, personne ne pourrait vivre sans environnement, de même, l'environnement est toujours dépendant d'un agent. Ces relations entre agent et environnement sont marquées par une circularité : les

modifications de l'environnement influencent les actions de l'agent et ces actions modifient l'environnement.

Si nous prenons le cas d'une tâche de conduite dans un environnement routier, l'agent devient l'automobiliste. Celui-ci évolue dans un environnement routier dans lequel il est susceptible de croiser de nombreux obstacles fixes ou mobiles (e.g., d'autres conducteurs). Il agit sur son environnement par le biais d'un outil : son véhicule. Pour cela il effectue des actions sur le volant pour maintenir un cap ou tourner et sur le pédalier pour maintenir sa vitesse, accélérer ou encore freiner. En retour, l'environnement va fournir des informations visuelles sur la vitesse et la direction de déplacement de l'automobiliste, qui permettront à l'agent de moduler son comportement par l'intermédiaire de sa voiture (Figure 2.1).

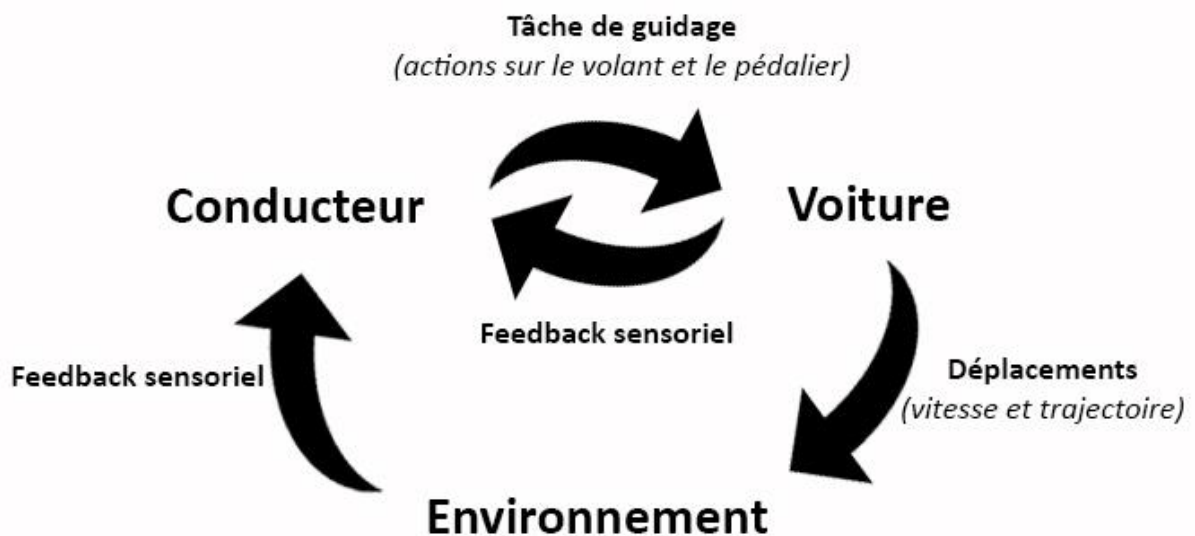


Figure 2. 1 : Circularité entre le conducteur et son environnement et entre le conducteur et sa voiture

Pour Gibson, les agents sont soumis aux différentes contraintes imposées par leur environnement. Ainsi, chaque agent perçoit son environnement d'une façon qui lui est propre en fonction de ses propriétés biologiques, de son expérience passée, de ses états

physiologiques et morphologique, etc. [Warren \(1984\)](#) a par exemple réalisé une expérience dans laquelle des participants de tailles différentes devaient estimer si la marche située devant eux était franchissable sans s'aider des mains. Les participants de petite taille estimaient que la hauteur maximale de franchissement de la marche était plus basse que les participants de grande taille. Toutefois, si l'on exprime les réponses des participants en fonction du rapport entre l'agent et l'environnement (rapport entre la longueur des membres inférieurs des participants et de la hauteur de la marche), les différences disparaissent ; le point critique apparaît à une même valeur du rapport. L'environnement n'est donc pas perçu en référence à une échelle de mesure extrinsèque, mais bien en référence à une échelle de mesure intrinsèque. Selon Gibson, cette perception est directe, sans que le sujet ait besoin de recourir à des calculs complexes.

De la même manière, dans le cadre de la conduite automobile, les ajustements de vitesse produits par les conducteurs à l'approche d'une intersection dépendraient des capacités d'action du véhicule conduit. Ainsi, le comportement produit par le conducteur dans son environnement routier dépendrait des capacités d'accélération, de freinage et de braquage du véhicule conduit.

2.2.2. Le couplage perception-action

Le couplage perception-action est un des concepts centraux dans l'approche écologique de la perception et de l'action. [Bootsma \(1998\)](#), propose de décomposer le couplage perception-action selon deux niveaux d'analyse distincts et complémentaires (Figure 2.2). Le premier niveau d'analyse (i.e., cycle information-mouvement) se situerait à un niveau fonctionnel et rendrait compte des relations existantes entre l'information et le mouvement. Un grand nombre de contributions empiriques et théoriques relèvent du

premier niveau d'analyse (e.g., [Lee, 1976](#) ; [Lee & Lishman, 1977](#) ; [Wann & Land, 2000](#) ; [Bootsma & Van Wieringen, 1990](#) ; [Bootsma, Houbiers, Whiting & Van Wieringen, 1991](#) ; [Bardy & Laurent, 1998](#) ; [Montagne, Cornus, Glize, Quaine & Laurent, 2000](#)). Il s'agit ici de décrire, d'analyser voire de formaliser les relations entre information et mouvement à partir d'un niveau d'analyse purement phénoménologique. Ce niveau d'analyse permet potentiellement de mettre en évidence des lois de contrôle régissant le couplage information-mouvement. Ces lois de contrôle peuvent rendre compte du comportement d'un agent ou de plusieurs catégories d'agents (Homme, robot, animal) dans le cadre de la réalisation d'une tâche particulière. Le deuxième niveau d'analyse (i.e., cycle perception-actuation) correspondrait quant à lui à l'implémentation du cycle information-mouvement par un agent particulier. Il explique comment les structures sous-jacentes (neurales, musculaires et/ou squelettiques) façonnent, influencent les relations entre information et mouvement.

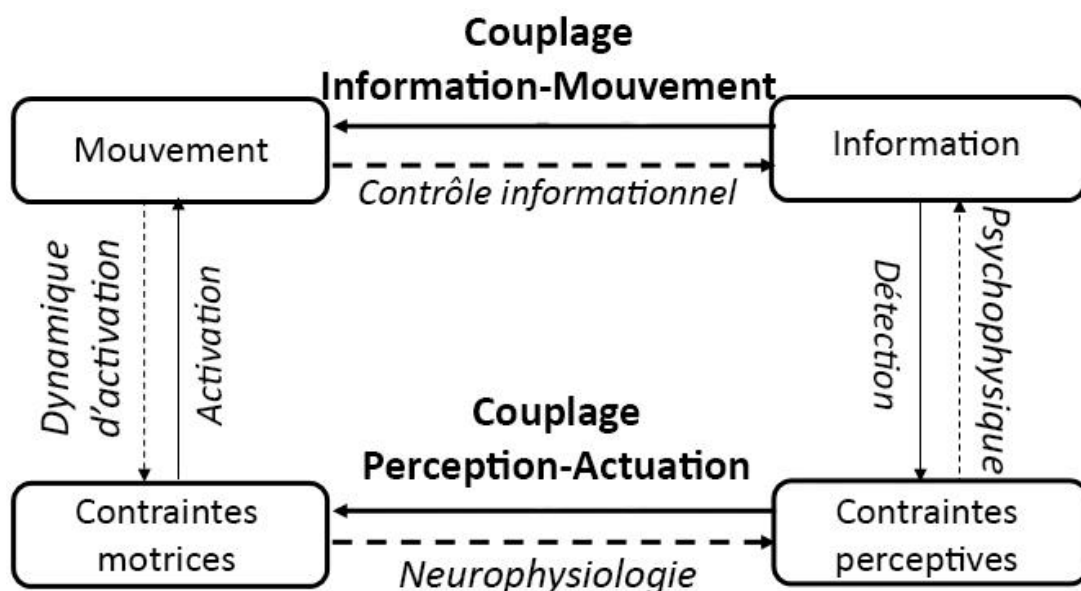


Figure 2. 2 : Représentation du couplage perception-action. Celui-ci peut être appréhendé selon deux niveaux d'analyse distincts mais complémentaires : le couplage information-mouvement et le couplage perception-actuation (i.e., [Bootsma, 1998](#)).

a. Le cycle information-mouvement

D'après Gibson, nous devons percevoir pour bouger, mais nous devons aussi nous déplacer pour percevoir ([Gibson, 1979](#)). Cette phrase illustre bien un autre postulat important de l'approche écologique de la perception et de l'action. Elle indique que le contrôle d'une action finalisée, comme une tâche de guidage en conduite automobile, repose sur la mise en œuvre d'un cycle information-mouvement. Ainsi, lorsqu'un agent se déplace dans son environnement et/ou que des objets de l'environnement se déplacent par rapport à lui, les transformations concomitantes de la scène optique donnent lieu à un flux optique. Le flux optique présente des patrons de changement qui sont préservés (i.e., des invariants) et qui informent l'agent sur les propriétés de l'environnement ou sur l'état de sa relation avec son environnement. Ces invariants sont fiables, et directement accessibles (pour peu que l'agent ait appris à les détecter). Lorsqu'ils sont utilisés, ces invariants accèdent au statut d'informations ([Warren, 1988](#)). Le contrôle d'un mouvement ou d'un déplacement peut reposer sur l'utilisation d'un invariant dans le cadre de la mise en œuvre d'un cycle information-mouvement (Figure 2.3). Certains travaux ont porté sur la modélisation de lois de contrôle qui ont pour objet de formaliser, pour une tâche particulière, le cycle information-mouvement. [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 (i.e., $\text{flux} = f(\text{force})$) et d'autre part, il définit la loi de spécification, qui rend compte de l'ensemble des forces appliquées sur l'agent en fonction des caractéristiques du flux optique (i.e., $\text{force} = g(\text{flux})$).

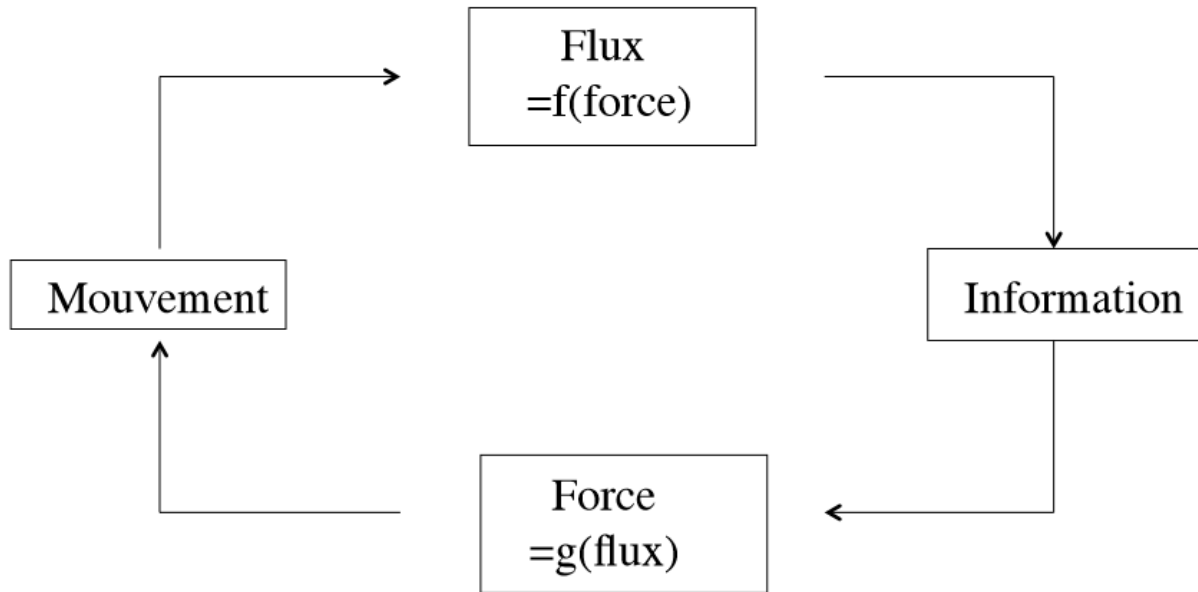


Figure 2. 3 : Cycle information-mouvement d'après [Warren \(1988\)](#).

Ainsi, une loi de contrôle peut être définie comme la relation entre un différentiel de production de force perçu par l'agent et un différentiel d'information perçue par l'agent (i.e., $f = g(\text{information})$). Elle constitue une opérationnalisation du cycle information-mouvement mettant en relation formellement un invariant et un paramètre du mouvement. L'invariant serait présent dans le flux perceptif et serait à même de résumer l'état de la relation agent-environnement à tout moment. Si cela s'avère nécessaire, l'agent pourrait procéder à des régulations successives de son déplacement qui en retour modifieraient le flux perceptif. Ainsi, une loi de contrôle simplifiée à l'extrême la problématique du contrôle perceptivo-moteur d'une tâche à travers la mise en relation d'un degré de liberté perceptif (i.e., l'invariant) et d'un degré de liberté moteur (i.e., le paramètre du mouvement).

L'utilisation d'une loi de contrôle par l'agent pour réaliser une action visuellement guidée a été étudiée à de nombreuses reprises, notamment pour une tâche d'interception d'un mobile (e.g., une balle) se déplaçant horizontalement (e.g., [Lenoir, Savelsbergh, Musch, Thiery, Ulyttenhove & Janssens, 1999](#) ; [Chardenon, Montagne, Buekers & Laurent, 2002](#) ;

[Chardenon, Montagne, Laurent & Bootsma, 2004](#) ; [2005](#) ; [Bastin & Montagne, 2005](#) ; [Bastin, Craig & Montagne, 2006](#) ; [Bastin, Calvin & Montagne, 2006](#) ; [Bastin, Jacobs, Morice, Craig & Montagne, 2008](#) ; [Morice, François, Jacobs & Montagne, 2010](#) ; [François, Morice, Blouin & Montagne, 2011](#)). Nous développons particulièrement les résultats de ces études car nous estimons qu'elles ont de nombreuses caractéristiques communes avec une tâche de traversée d'intersection.

En effet, d'après [Chardenon et al. \(2004\)](#) les mécanismes qui sous-tendent le contrôle de différentes tâches locomotrices dirigées vers une cible pourraient partager une architecture commune. Premièrement, les deux tâches (i.e., interception et approche d'une intersection) impliquent un croisement de trajectoires. En effet, pour une tâche d'interception d'un mobile la trajectoire de l'agent est amenée à rencontrer la trajectoire de la balle à intercepter. De même, lors d'une traversée d'intersection la trajectoire de l'automobiliste est amenée à rencontrer les trajectoires d'autres véhicules au niveau de l'intersection. Deuxièmement, les agents doivent intercepter une fenêtre spatio-temporelle en mouvement dans les deux tâches mais à une échelle différente. En effet, pour intercepter un mobile (e.g., une balle) l'agent doit intercepter celui-ci dans une fenêtre spatio-temporelle plutôt étroite (i.e., centimètre et milliseconde) tandis que l'interception d'un créneau du trafic (i.e., entre deux véhicules croisés) implique une fenêtre spatio-temporelle plutôt large (de l'ordre du mètre et de la seconde). Enfin, pour une tâche d'interception de mobile et pour une tâche de traversée d'intersection, l'agent doit réguler sa vitesse (et parfois sa direction) pour atteindre son objectif qui est soit l'interception du mobile soit la traversée d'une intersection entre deux véhicules du trafic.

Les études citées précédemment portant sur une tâche d'interception de mobile ont utilisé un dispositif de réalité virtuelle. L'agent était situé sur un tapis roulant et devait réguler sa vitesse de marche afin d'intercepter une balle virtuelle. Dans ces études les auteurs ont manipulé la taille et le taux d'expansion de la balle (e.g., [Chardenon et al., 2004](#) ; [Bastin et al., 2008](#)), sa vitesse d'approche (e.g., [Chardenon et al., 2005](#)), sa trajectoire (e.g., [Morice et al., 2010](#) ; [Bastin, Craig & Montagne, 2006](#) ; [Bastin et al., 2008](#)), son angle d'approche (e.g., [Chardenon et al., 2005](#)) ainsi que son lieu d'arrivée (e.g., [Chardenon et al., 2005](#) ; [Bastin & Montagne, 2005](#)). Les résultats de ces études indiquaient qu'une loi de contrôle simple basée sur la mise en relation d'un paramètre du mouvement (e.g., l'accélération) et d'une information (e.g., le taux de changement de l'angle de relèvement) est à même de rendre compte du comportement de régulation dans une gamme de situation extrêmement variée. L'angle de relèvement est formé par la position du mobile à intercepter et la direction de déplacement de l'agent (e.g., figure 2.4a). L'absence de changement de cet angle informerait l'agent qu'il effectue les bonnes régulations de son déplacement pour intercepter le mobile. A l'inverse, si le taux de changement de l'angle de relèvement n'est pas nul et en l'absence de régulation de son déplacement, l'agent n'interceptera pas le mobile. Ainsi, lorsque l'angle de relèvement diminue (i.e., taux de changement de l'angle négatif ; figure 2.4b), l'agent devra accélérer. A l'inverse, lors d'une augmentation de l'angle de relèvement (i.e., taux de changement de l'angle positif ; figure 2.4b), l'agent devra décélérer pour intercepter la cible. L'objectif de l'agent serait donc de maintenir nul le changement de l'angle de relèvement. En conduite automobile, la cible pourrait correspondre au centre de la fenêtre inter-véhiculaire choisie par le conducteur. Pour traverser l'intersection en toute sécurité le conducteur devrait maintenir constant l'angle de relèvement entre la direction de son déplacement et le centre de la fenêtre inter-

véhiculaire qu'il aura préalablement sélectionnée. Ainsi, une loi de contrôle reliant le taux de changement de l'angle de relèvement à l'accélération requise de l'agent pour réussir la tâche a été formalisée (Equation 1 ; Chardenon et al., 2004 ; Bastin, Craig & Montagne, 2006).

$$\ddot{Y}(t) = k_1 * \frac{1}{1 + 200 * e^{-10*t}} * \dot{\theta}(t) + k_2 * \dot{Y}(t) \quad (\text{Equation 1})$$

Où $\ddot{Y}$ représente l'accélération du participant, $\dot{\theta}$ représente le taux de changement de l'angle de relèvement, $\dot{Y}$ la vitesse de déplacement du participant, $\frac{1}{1+200*e^{-10*t}}$ une fonction d'activation et k_1 et k_2 représentent des paramètres.

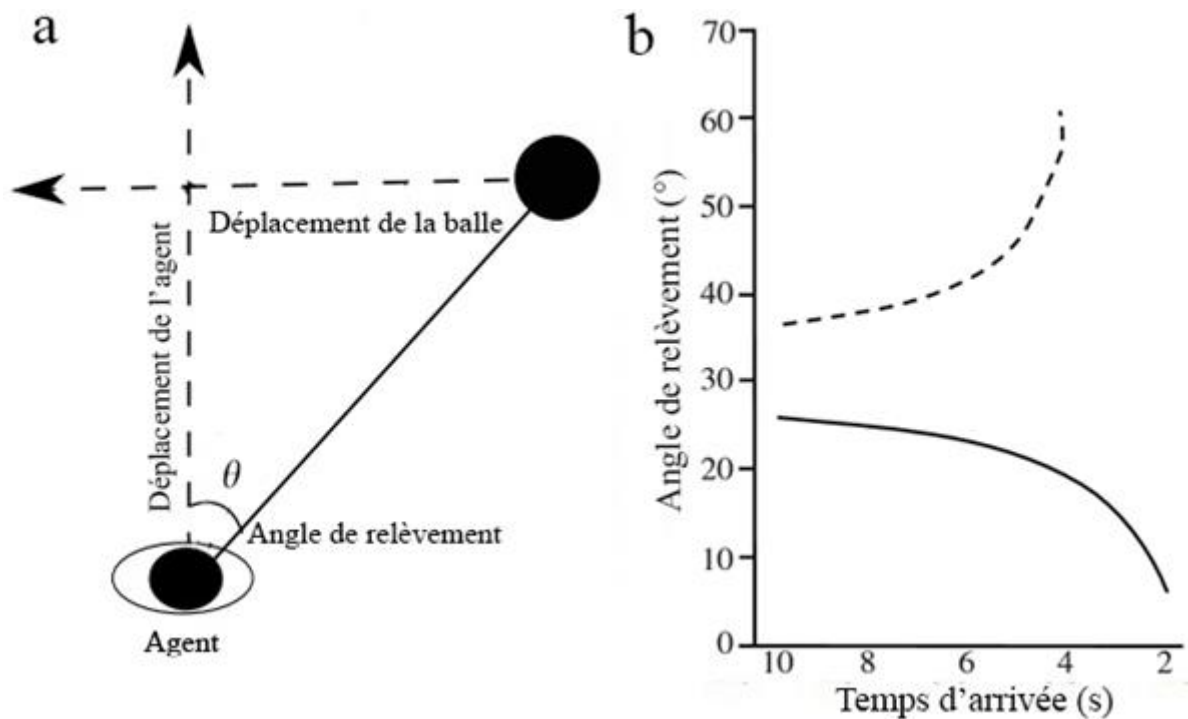


Figure 2. 4 : a) Représentation de l'angle de relèvement pour une tâche d'interception de balle et b) l'évolution de cet angle au cours de la phase d'approche. La courbe pleine représente une arrivée trop tardive de l'agent par rapport à la cible, tandis que la courbe en pointillés représente une arrivée trop précoce (la vitesse d'approche de l'agent et de la balle étant constantes ; i.e., Chardenon et al., 2005).

Toutefois, la formalisation d'une loi de contrôle n'est pas toujours facile à réaliser, a fortiori lorsque les contraintes de la tâche sont complexes. De ce fait, de nombreux travaux ont étudié le cycle information-mouvement sans pour autant avoir formalisé une loi de contrôle. Ainsi, pour diverses habiletés motrices de multiples études ont émis l'hypothèse de l'utilisation du cycle information-mouvement opérant au cours de la réalisation d'une action finalisée comme la frappe de balle en tennis de table (i.e., [Bootsma & Van Wieringen, 1990](#) ; [Bootsma et al., 1991](#)), le placement des appuis au saut en longueur (i.e., [Lee, Lishman & Thomson, 1982](#) ; [Hay, 1988](#) ; [Berg, Wade & Greer, 1994](#) ; [Glize & Laurent, 1997](#) ; [Scott, Li & Davids, 1997](#) ; [Montagne et al., 2000](#)) ou encore la réception lors d'un salto arrière de pied ferme (i.e., [Bardy & Laurent, 1998](#)). Ces études se sont focalisées sur l'analyse du comportement de régulation de l'agent lors de la réalisation de diverses habiletés motrices et divers marqueurs du couplage information-mouvement ont été identifiés dans la cinématique de l'agent. La mise en œuvre du cycle information-mouvement devrait ainsi se caractériser par un gain en précision en cours d'exécution du mouvement (ou du déplacement) et une évolution opposée des patrons de variabilité inter-essais des variables de contrôle et d'ajustement.

a.1. Gain en précision en cours d'exécution du mouvement

Ce gain en précision a été observé dans des activités perceptivo-motrices très variées comme par exemple l'interception d'une balle (e.g., [Peper, Bootsma, Mestre & Bakker, 1994](#)). Les résultats de cette étude indiquaient que la vitesse du mouvement de la main tendait graduellement vers la vitesse requise pour réussir la tâche et que dans les dernières centaines de millisecondes précédant le contact la vitesse courante était parfaitement conforme à la vitesse requise. Un résultat équivalent a été observé lors de la course d'élan

en saut en longueur (e.g., [Montagne et al., 2000](#)). La quantité d'ajustement de la longueur de foulée à produire pour pointer précisément la planche d'appel diminue progressivement au fil des foulées pour devenir minimale lors de l'impulsion finale. Dans la même étude les auteurs ont développé une méthode originale leur permettant de déterminer avec précision à partir de quelle foulée l'agent commençait à réguler son déplacement. Les résultats indiquaient que les régulations de l'agent pouvaient être initiées entre la 6^{ème} foulée et la dernière foulée avant la planche d'appel. Ils indiquent également que le rang d'initiation de la régulation dépend de la quantité de régulation à produire. Ainsi, plus la quantité de régulation est importante pour réussir la tâche plus l'agent initie la régulation de ses longueurs de foulée précocement.

a.2. Evolution opposée des patrons de variabilité inter-essais des variables de contrôle et d'ajustement

En saut en longueur, lors de la course d'élan l'objectif de l'agent est de placer son dernier appui le plus proche possible de la planche tout en ayant une vitesse importante afin de sauter le plus loin possible. Dans cet exemple la variable contrôle serait la distance appui-planche. La variabilité inter-essais de la distance séparant le pied de l'agent de la planche d'appel peut être calculée pour chaque foulée de la phase d'approche. Les résultats dans la littérature indiquaient que pendant les dernières foulées réalisées au cours de la prise d'élan (i.e., environ les quatre dernières) la variabilité inter-essais (i.e., entre différent essais d'un même participant) de la distance appui-planche diminuait considérablement pour atteindre une valeur minimale lors de la dernière foulée (e.g., figure 2.5). Cette diminution de la variabilité inter-essais de la variable contrôle serait directement liée à une augmentation de la variabilité inter-essais de la variable d'ajustement, la longueur de foulée (e.g., figure 2.5).

En effet, au cours de la course d'élan l'agent accumulerait des erreurs au niveau du placement de ses appuis. Afin de placer son pied le plus proche possible de la planche d'appel, l'agent compenserait cette erreur en modulant ses dernières longueurs de foulées. La précision finale a donc été obtenue grâce à la régulation de l'amplitude des dernières foulées de la course d'élan. De la même façon, lors de la réalisation d'un salto arrière de pied ferme (e.g., [Bardy & Laurent, 1998](#)) la variable contrôle était l'orientation du corps de l'agent. Les résultats de l'étude indiquaient que la variabilité de l'orientation du corps diminuait fortement de manière concomitante avec une augmentation de la variabilité des variables d'ajustement (i.e., l'angle tronc-cuisse et l'angle cuisse-jambe) peu avant la réception de l'agent. La vitesse de rotation du corps a donc été contrôlée par la régulation de l'ouverture ou de la fermeture des angles tronc-cuisse et cuisse-jambe. Par conséquent, ces résultats montraient que les erreurs accumulées de la variable de contrôle au début de la réalisation de la tâche ont été compensées à la fin du mouvement, par une augmentation de la variabilité de deux variables d'ajustements. Ce contrôle permet à l'agent de s'adapter à une très grande diversité de conditions d'exécution du mouvement et tout au long de la réalisation du mouvement. Ainsi, chaque mouvement réalisé par l'agent est unique et la variable ajustement permet de corriger le mouvement afin qu'il soit, à l'issue de son exécution, le plus précis possible.

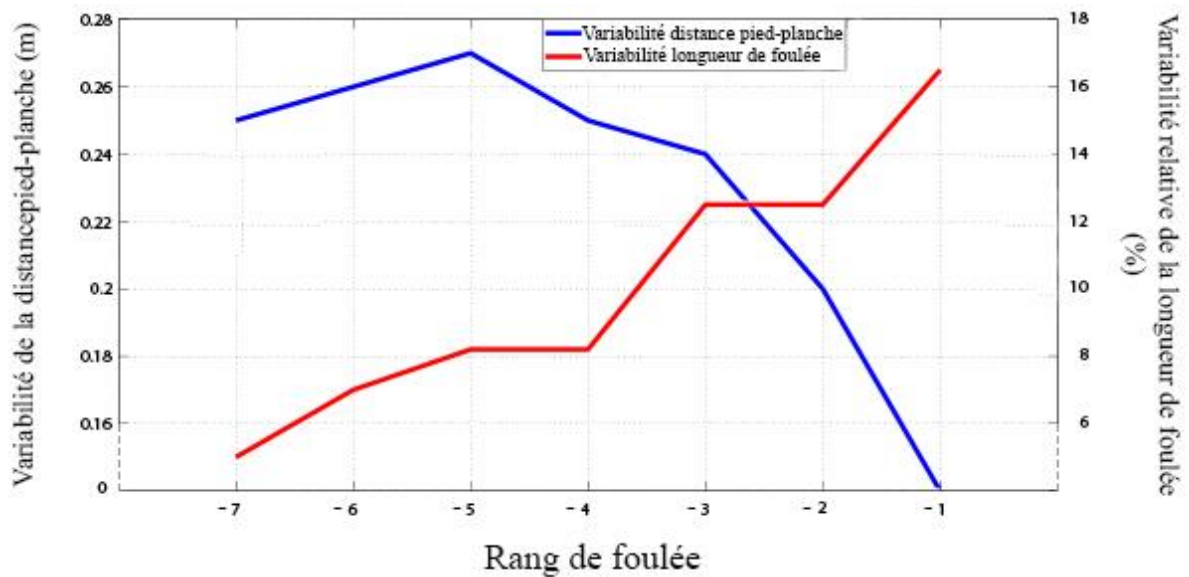


Figure 2. 5 : Evolution de la variabilité inter-essais de variable de contrôle (i.e., distance pied-planche) et de la variabilité inter-essais de la variable d'ajustement (i.e., longueur de foulée) lors de la course d'élan pour réaliser un saut en longueur (i.e., Berg et al., 1994).

a.3. Métaphore d'un contrôle en forme d'entonnoir

Bootsma et Van Wieringen (1990) ont démontré que les pongistes modifiaient constamment la position de leur raquette et de leur bras en fonctions de leur position par rapport à la balle. Dans cette étude un intérêt particulier a été porté sur la nature des mouvements effectués par le bras et la raquette des pongistes. Ainsi, les auteurs ont étudié l'orientation de la raquette du pongiste au cours de la réalisation d'un coup droit. Ils ont remarqué qu'à l'initiation du mouvement, l'orientation de celle-ci était très variable, puis, au cours de l'exécution de l'action elle devenait plus précise, faisant diminuer la variabilité inter-essai jusqu'à devenir presque nul lors de l'impact entre la raquette et la balle. Ainsi, la variabilité inter-essai de l'orientation de la raquette était très importante et diminuait progressivement au cours de l'exécution du mouvement, rappelant la forme d'un entonnoir (i.e., figure 2.6). C'est pour cette raison que ces auteurs ont utilisé la métaphore de l'entonnoir (i.e., funnel-like type of control) pour décrire la tolérance de la variabilité de la

variable de contrôle au cours de l'exécution du mouvement afin de réussir la tâche. Ainsi, plus les contraintes temporelles seraient faibles, plus la tolérance au niveau de la variabilité de la variable contrôle serait importante (e.g., Figure 2.6). Les résultats de l'étude de [Montagne et al. \(2000\)](#) sont conformes à l'idée d'un contrôle en forme d'entonnoir. En effet, plus les régulations requises étaient importantes, plus elles étaient initiées précocément. Ainsi, les régulations ne sont initiées que lorsque les circonstances l'exigent. Le patron de variabilité des variables d'ajustement, quant à lui, présente une évolution inverse (e.g., [Chardenon et al., 2002](#)).

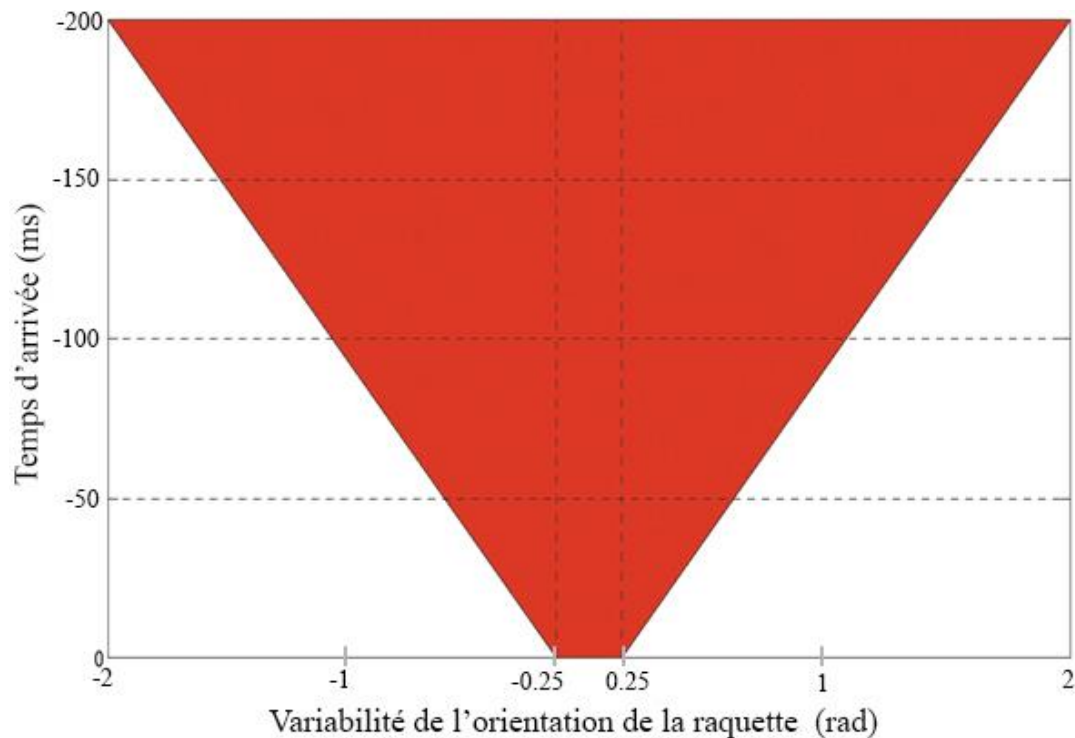


Figure 2. 6 : Exemple de contrôle en forme d'entonnoir. Plus les contraintes temporelles sont faibles, plus la variabilité de la variable contrôle est importante.

Ensemble, ces différents marqueurs fournissent un grand nombre de preuves soutenant l'utilisation d'un cycle information-mouvement lors de la réalisation d'une action finalisée.

b. Le cycle perception-actuation

L'objectif des recherches s'inscrivant dans le second niveau d'analyse est de montrer de quelle manière le cycle information-mouvement peut être implémenté en prenant en compte des contraintes neurales, musculaires ou squelettiques. Peu d'études s'inscrivant dans le cadre de l'approche écologique ont opté pour ce niveau d'analyse (e.g., [De Rugy, Taga, Montagne, Buekers & Laurent, 2002](#) ; [Dessing, Bullock, Peper & Beek, 2002](#) ; [Beek, Peper, Daffertshofer, Van Soest & Meijer, 1998](#)).

Bien que notre travail s'inscrive à un niveau purement phénoménologique (i.e., cycle information-mouvement), ce deuxième niveau d'analyse peut nous être utile. En effet, les études de Milner et Goodale ont mis en évidence deux voies neuro-anatomiques distinctes correspondant à des fonctions elles-mêmes distinctes ([Goodale & Milner, 1992](#) ; [Milner & Goodale, 1995](#)). Selon ces auteurs, le système visuel serait divisé en deux sous-systèmes indépendants, l'un, ventral, dédié à la vision pour la perception, et l'autre, dorsal, dédié à la perception pour réaliser une action (Figure 2.7). De ce fait, ces études fournissent des résultats qui semblent montrer que compte tenu du fait que les structures anatomiques qui sous-tendent la perception pour la vision et la perception pour l'action sont distinctes, les études qui s'intéressent aux coordinations perceptivo-motrices doivent préserver les liens entre perception et action.

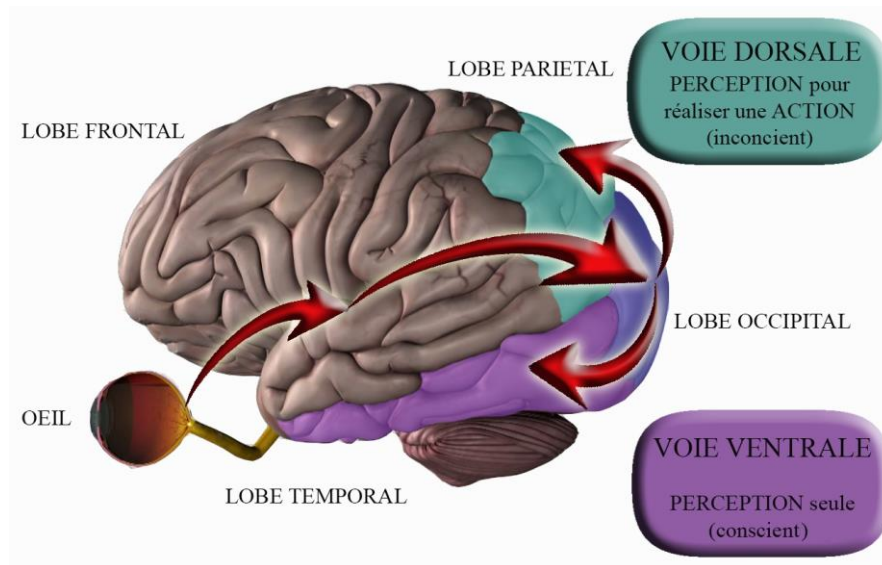


Figure 2. 7 : *Système visuel selon Goodale et Milner. La voie ventrale (occipito-temporale) serait impliquée dans la vision pour la perception et la voie dorsale (occipito-pariétale) serait impliquée dans la vision pour réaliser une action.*

Ainsi, lorsqu'une voie est lésée, Milner et Goodale montrent que la fonction particulière associée devient inopérante sans que la fonction associée à l'autre voie soit affectée (i.e., [Goodale, Milner, Jakobson & Carey, 1991](#) ; [Milner et al., 1991](#) ; [Goodale, Meenan, Bülthoff, Nicolle, Murphy & Racicot, 1994](#) ; [Jeannerod, Decety & Michel, 1994](#)). De la même manière, en utilisant une illusion d'optique (e.g., illusion de Müller-Lyer ; Figure 2.8a) on peut duper un agent en lui demandant de juger une longueur de segment. Dans ce type d'illusion d'optique, deux segments de ligne de longueur égale étaient présentés aux participants, l'un se terminant par des flèches pointant vers l'extérieur, l'autre par des flèches pointant vers l'intérieur (Figure 2.8a). Ils devaient déterminer lequel des deux segments était le plus long. Bien souvent, les participants jugeaient que le segment se terminant par des flèches pointant vers l'extérieur était plus petit que le segment se terminant par des flèches pointant vers l'intérieur. Or, lorsqu'on demande aux participants de réaliser une tâche de pointage sur les extrémités des deux segments ils ne commettent que très peu d'erreurs (e.g., [Bruno, Bernardis, & Gentilucci, 2008](#) ; Figure 2.8b).

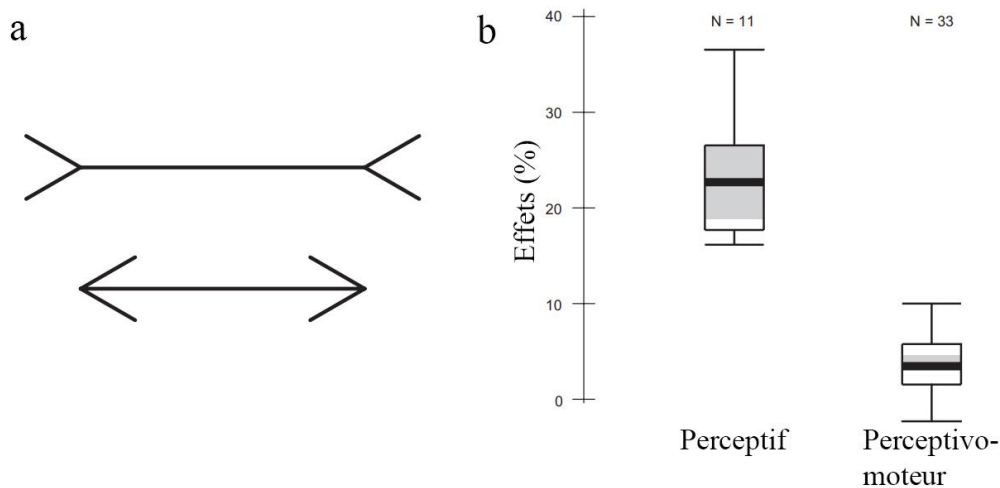


Figure 2. 8 : a) Illusion de Müller-Lyer. b) Comparaison de la distribution des effets des illusions d'optique (%) dans des tâches perceptives et des tâches perceptivo-motrices. Les traits épais représentent les médianes de chaque groupe. Les extrémités des boîtes indiquent le centre de 50% des distributions. Les moustaches indiquent des valeurs maximales et minimales. Les zones grisées représentent des intervalles de confiance approximatifs (95%) autour des médianes de chaque groupe (i.e., Bruno et al., 2008).

Wrage et al. (2000) ont également utilisé l'illusion de Müller-Lyer afin de comparer les mécanismes perceptifs et les mécanismes perceptivo-moteurs impliqués dans la production d'un déplacement. Pour cela, ils ont réalisé deux expériences dans lesquelles les participants devaient soit réaliser un jugement de distance soit parcourir activement la même distance. Dans la première expérience les participants devaient effectuer les deux tâches dans un référentiel exocentré (i.e., localisation de l'objet par rapport à un autre objet), sans retour visuel. Dans la deuxième expérience ils devaient réaliser ces tâches dans un référentiel égocentré (i.e., localisation de l'objet par rapport à l'agent). Les résultats indiquaient que dans un référentiel exocentré un biais similaire, lié à l'illusion d'optique Müller-Lyer, a été observé dans les deux tâches (Figure 2.9a). A l'inverse, dans un référentiel égocentré les participants ont continué à être biaisés par l'illusion d'optique dans les conditions dans lesquelles ils devaient réaliser une tâche de jugement, alors que le biais avait disparu lorsqu'ils devaient réaliser une marche active (Figure 2.9b). Ainsi, ces résultats

mettant en avant l'hypothèse de Milner et Goodale selon laquelle il y aurait un support perceptif différent selon la tâche à réaliser.

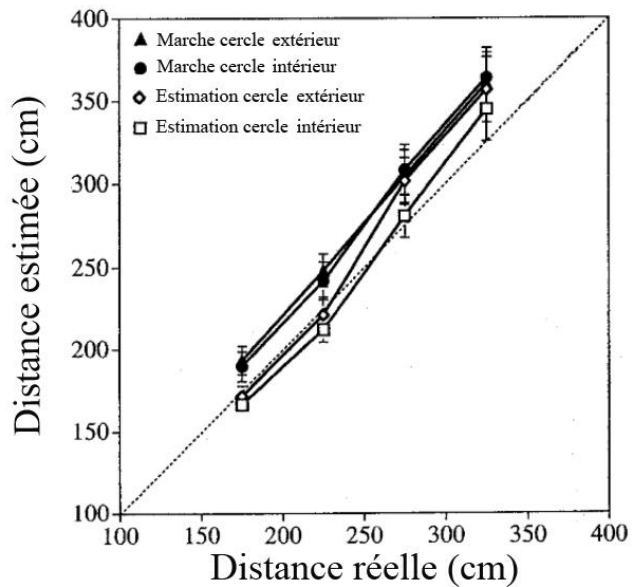
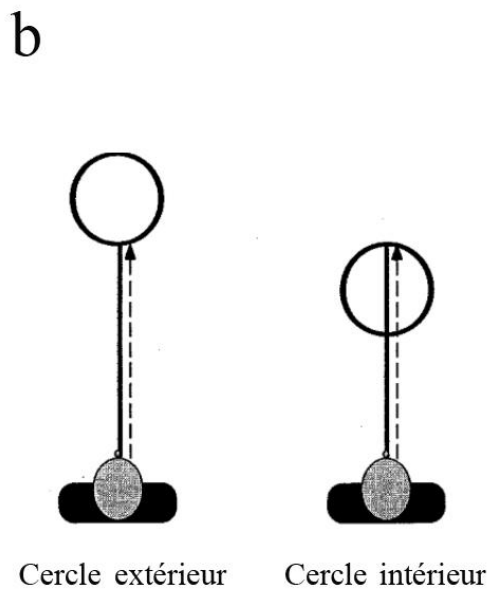
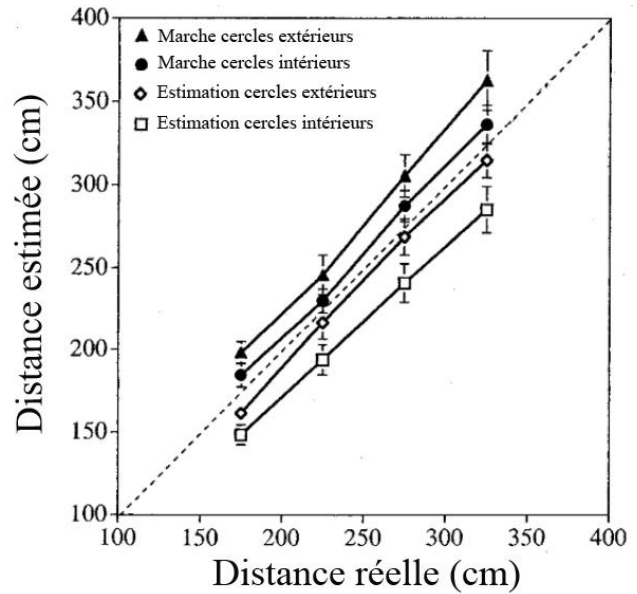
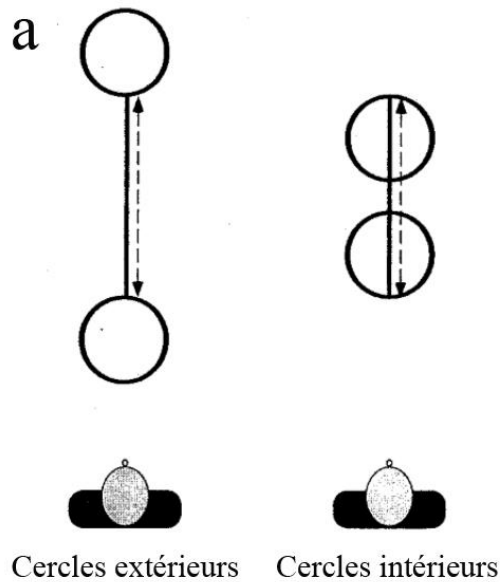


Figure 2. 9 : Estimation moyenne de la distance d'une ligne au sol avec l'illusion d'optique Müller-Lyer en fonction de la tâche à réaliser (i.e., tâche de jugement ou marche active). a) Etude de l'effet de la tâche à réaliser dans un référentiel exocentré. b) Etude de l'effet de la tâche à réaliser dans un référentiel égocentré (i.e., [Wrage, Creem & Proffitt, 2000](#)).

Par conséquent, ces différentes études montrent l'importance de prendre en compte les contraintes neuro-anatomiques dans le cadre de la compréhension des liens entre perception et action. Ainsi, la vision pour la perception et la vision pour l'action sollicitent des voies différentes, si bien que s'intéresser à la conduite automobile en se basant sur des paradigmes d'extrapolation mène à s'intéresser à des processus qui ne sont pas mis en œuvre dans des tâches de conduite dites « écologiques ».

2.3. Cycle information-mouvement et tâche de traversée d'intersection

Actuellement relativement peu d'études se sont intéressées au comportement de conduite des usagers de la route en préservant le lien naturel liant perception et action. Dans certaines de ces études, il était demandé aux participants de prendre la décision d'initier ou non une manœuvre (Oudejans, Michaels & vanDort, 1996 ; Gray, 2004 ; Mohebbi & Gray, 2007 ; Morice, Diaz, Fajen, Babilio & Montagne, 2015 ; Babilio et al., 2015 ; Marti et al., 2015). Dans d'autres études, le comportement de régulation des participants était analysé grâce à des tâches de traversée de route réalisées par des piétons (Lee et al., 1984 ; Jiang, Pang, Li & Pan, 2016), des cyclistes (Plumert, Kearney & Cremer, 2004 ; 2007 ; Chihak, Plumert, Ziemer, Babu, Grechkin, Cremer & Kearney, 2010 ; Plumert, Kearney, Cremer, Recker & Strutt, 2011 ; Grechkin, Chihak, Cremer, Kearney & Plumert, 2013 ; Chihak, Grechkin, Kearney, Cremer & Plumert, 2014 ; Plumert & Kearney, 2014 ; Nikolas, Elmore, Franzen, O'Neal, Kearney & Plumert, 2016) ou des automobilistes (Hancock et al., 1991 ; Louveton, Bootsma, Guerrin, Berthelon & Montagne, 2012 ; Louveton, Montagne, Berthelon & Bootsma, 2012 ; Louveton, Montagne, Bootsma & Berthelon, soumis). Ces études ont également répertorié différents facteurs de risque susceptibles d'influencer le comportement des usagers de la route. Ces facteurs de risques, tout comme pour les

précédentes études peuvent être reliés au triptyque de contraintes présenté dans le paragraphe précédent (i.e., tâche à réaliser, environnement et caractéristiques du couple conducteur-véhicule). Pour préserver le lien entre l'information et le mouvement, les expérimentateurs ont utilisé un paradigme expérimental différent du paradigme d'extrapolation du mouvement.

2.3.1. Paradigme utilisé

Toutes les études ont été réalisées dans des environnements virtuels immersifs. Dans les expériences réalisées avec un simulateur de vélo (e.g., [Plumert & Kearney., 2014](#)), les participants devaient s'approcher d'une route à double sens de circulation et traverser une intersection en toute sécurité en sélectionnant une fenêtre temporelle (i.e., entre deux véhicules ; Figure 2.10a). Dans les expériences réalisées avec un simulateur de voiture (i.e., [Louveton, Bootsma et al. 2012](#); [Louveton, Montagne et al., 2012](#) ; [Louveton et al., soumis](#)) les participants étaient confrontés à un train de véhicules venant de leur gauche uniquement (Figure 2.10b). Ce train de véhicules était constitué d'un camion, suivi de deux voitures et d'un autre camion se déplaçant également vers l'intersection. En l'absence de signalisation lui indiquant quel véhicule était prioritaire l'automobiliste devait traverser l'intersection en utilisant l'espace disponible entre les deux voitures (i.e., la fenêtre inter-véhiculaire).



Figure 2. 10 : Environnement routier lors d’une traversée d’intersection a) pour un cycliste (e.g., [Grechkin et al., 2013](#)) et pour un automobiliste (i.e., [Louveton, Bootsma et al. 2012](#) ; [Louveton, Montagne et al., 2012](#) ; [Louveton et al., soumis](#)).

Globalement, les études préservant le lien naturel liant perception et action ont cherché à démontrer l’existence de régulations continues de la vitesse de déplacement des agents lors d’une tâche de traversée et ainsi de mettre en évidence l’importance du contrôle en ligne. Ces études cherchaient à identifier les marqueurs du couplage en manipulant de nombreuses contraintes liées à la tâche à réaliser (e.g., [Plumert et al., 2004](#) ; [Plumert et al., 2007](#) ; [Chihak et al., 2010](#) ; [Louveton, Bootsma et al. 2012](#) ; [Louveton, Montagne et al., 2012](#) ; [Grechkin et al., 2013](#) ; [Chihak et al., 2014](#) ; [Plumert & Kearney, 2014](#) ; [Louveton et al., soumis](#)), à l’environnement (e.g., [Louveton, Bootsma et al. 2012](#) ; [Louveton et al., soumis](#)) et

au couple conducteur-véhicule (e.g., [Plumert et al., 2004](#) ; [Plumert et al., 2007](#) ; [Chihak et al., 2010](#) ; [Grechkin et al., 2013](#) ; [Chihak et al., 2014](#) ; [Plumert & Kearney, 2014](#)).

Pour mettre en évidence les ajustements comportementaux produits par les conducteurs lors de la phase d'approche, les expérimentateurs ont étudié les profils de vitesse et de déviation courante (DC) des participants en manipulant certaines contraintes de la tâche (i.e., distance de départ du participant, taille de la fenêtre-inter-véhiculaire et vitesse d'approche des véhicules croisés). Ainsi, pour comprendre l'effet des changements de vitesse sur la future position de franchissement au moment de la traversée, les expérimentateurs ont utilisé un indicateur de déviation courante inspiré de la mesure d'erreur courante qui peut être trouvée dans la littérature sur l'interception de mobiles (e.g., [Chardenon et al., 2002](#)). Cet indicateur correspondrait à la distance entre le centre de la fenêtre inter-véhiculaire et la position de franchissement au sein de cette fenêtre temporelle au moment de la traversée dans le cas où le participant maintiendrait sa vitesse instantanée constante sur le reste du parcours. La déviation courante du participant par rapport au centre de la fenêtre est calculée à chaque instant (t) comme suit :

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

D étant la distance à l'intersection, V la vitesse instantanée et T le temps restant avant la traversée de l'intersection ([Louveton, 2012](#)). Les profils de vitesse étaient synchronisés sur l'instant où le participant traverse l'intersection.

2.3.2. Les différents facteurs de risque

Pour mettre en évidence les régulations comportementales des conducteurs au cours de la phase d'approche et de la traversée d'intersection un triptyque de contraintes a été manipulé expérimentalement. Ce triptyque comprend, tout comme dans les études ayant utilisé un paradigme d'extrapolation du mouvement, des contraintes liées à la tâche à réaliser, des contraintes environnementales et des contraintes liées au couple conducteur-véhicule.

a. Contraintes de la tâche à réaliser

De nombreuses contraintes spatio-temporelles sont susceptibles d'influencer les régulations des automobilistes. Les études préservant le lien entre perception et action ont manipulé l'Offset, la taille de la fenêtre-inter-véhiculaire à traverser et la vitesse d'approche des véhicules croisés à l'intersection.

a.1. Offset

L'offset correspond à une manipulation du point de départ des participants au début de l'essai aboutissant à différents lieux de franchissement (en référence à la fenêtre inter-véhiculaire à intercepter), si la vitesse initiale était maintenue constante tout au long de l'essai. Ainsi, en maintenant une vitesse inchangée les participants traversaient l'intersection à l'arrière (i.e., offset négatif), au centre (i.e., offset nul) ou à l'avant de la fenêtre inter-véhiculaire (i.e., offset positif). De ce fait, l'Offset affectait dès le début des essais la déviation courante du participant. Les résultats indiquaient globalement que les participants compensaient graduellement durant toute la tâche le décalage spatio-temporel (Figure 2.11b) qui leur était imposé par l'Offset en modulant leur vitesse (Figure 2.11a) pour

traverser l'intersection à proximité du centre de la fenêtre inter-véhiculaire. En effet, dans les conditions d'offset négatif les conducteurs accéléraient tout au long de la phase d'approche. Dans les conditions d'offset nul, les conducteurs maintenaient leur vitesse constante au début de la phase d'approche puis accéléraient quelques secondes avant de traverser l'intersection. Enfin, dans les conditions d'offset positif, les participants décéléraient tout au long de la phase d'approche puis accéléraient légèrement peu avant de traverser l'intersection. Les ajustements observés dans la vitesse de déplacement des automobilistes avec des contraintes d'Offset étaient similaires à ceux observés dans les tâches d'interception (e.g., [Bastin, Craig & Montagne, 2006](#)).

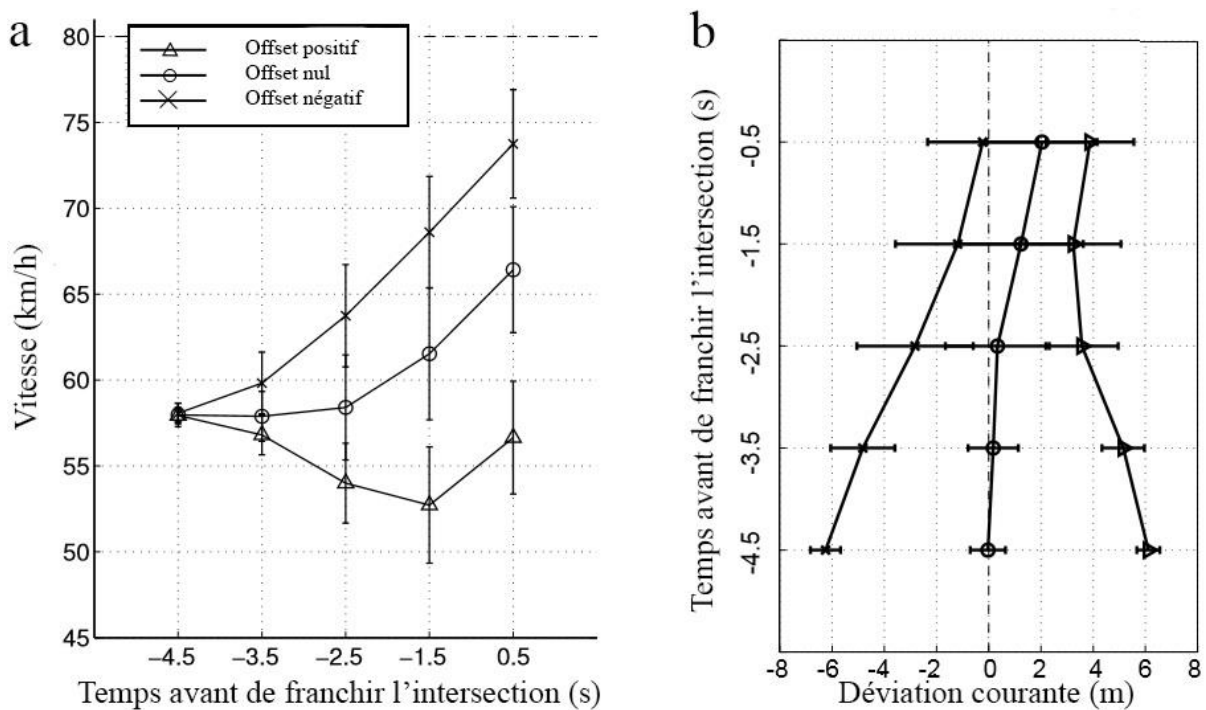


Figure 2. 11 : a) Vitesse des participants dans les trois conditions. b) Déviation courante des participants dans les trois conditions d'Offset. Les lignes pointillées représentent le centre de l'espace inter-véhiculaire (i.e., [Louveton, Bootsma et al. 2012](#)).

a.2. Taille de la fenêtre-inter-véhiculaire

Une des différences importante entre une tâche d'interception de mobile sur le plan horizontal et une tâche de traversée d'intersection serait d'une part que la cible (i.e., fenêtre inter-véhiculaire) est constituée de deux bornes indépendantes et d'autre part, que ces deux bornes matérialisent la cible à atteindre par l'agent. C'est pour ces différences majeures que certaines études préservant le lien naturel liant perception et action se sont intéressées à l'incidence des caractéristiques des fenêtres inter-véhiculaires sur le comportement de régulation des agents. Une partie de ces études s'est intéressée à l'incidence de la taille de la fenêtre inter-véhiculaire sans variation de celle-ci pendant la phase d'approche (e.g., [Louveton, Bootsma et al., 2012](#) ; [Plumert & Kearney, 2014](#)). D'autres se sont intéressées à l'incidence de l'alignement des fenêtres inter-véhiculaire, positionnées au niveau des voies à doubles sens de circulation, sur les régulations des cyclistes au niveau de l'intersection (e.g., [Grechkin et al., 2013](#) ; Figure 2.12). Les résultats indiquaient également que les automobilistes traversaient d'autant plus près du véhicule de tête que la fenêtre était grande (i.e., [Louveton, Bootsma et al., 2012](#)). Ainsi, ces résultats semblaient montrer la mise en œuvre d'une stratégie orientée vers la maximisation de la marge de sécurité vis-à-vis du véhicule suiveur. [Grechkin et al. \(2013\)](#) ont étudié le comportement de traversée des cyclistes en fonction du moment d'arrivée de deux fenêtres inter-véhiculaires sur une intersection. Les deux fenêtres, représentaient un créneau dans lequel les cyclistes pouvaient traverser et évoluaient en sens contraire sur une route à double sens de circulation (i.e., Figure 2.12). Ainsi, pour les conditions dans lesquelles les deux fenêtres étaient synchrones (i.e., aligned gap), les deux fenêtres inter-véhiculaires arrivaient sur l'intersection en même moment et étaient donc parfaitement alignées (i.e., Figure 2.12a). A l'inverse, pour les conditions dans lesquelles les deux fenêtres étaient asynchrones (i.e.,

rolling gap), la première fenêtre inter-véhiculaire rencontrée par l'agent arrivait sur l'intersection avant la fenêtre inter-véhiculaire située sur la voie la plus éloignée (i.e., Figure 2.12b). Les résultats de cette expérience ont indiqué que les cyclistes traversaient plus volontiers l'intersection dans les conditions où les deux fenêtres inter-véhiculaires étaient synchrones par rapport aux conditions dans lesquelles les fenêtres étaient asynchrones. De plus, ces deux variables indépendantes ont donné lieu à des différences au niveau de la cinématique des cyclistes. En effet des différences substantielles dans la trajectoire, la vitesse de déplacement, et la position d'entrée dans les fenêtres inter-véhiculaires ont été observées.

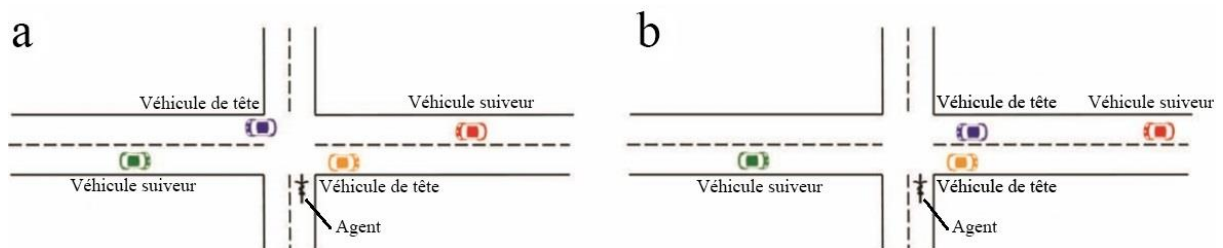


Figure 2. 12 : a) Fenêtres inter-véhiculaires synchrones lors du franchissement de l'intersection. b) Fenêtres inter-véhiculaires asynchrones lors de la traversée de l'intersection (i.e., [Grechkin et al., 2013](#)).

a.3. Vitesse d'approche des véhicules croisés

[Louveton, Montagne et al. \(2012\)](#) ont manipulé indépendamment la cinématique des deux voitures bornant la fenêtre inter-véhiculaire. Cela leur a permis d'étudier d'une part l'influence des contributions spécifiques de chacun des véhicules bornant la fenêtre inter-véhiculaire et d'autre part, l'influence de l'ensemble de la fenêtre inter-véhiculaire (i.e., variation de vitesse et de taille globale de la fenêtre inter-véhiculaire) sur les comportements de régulation des automobilistes. En effet, les véhicules bornant la fenêtre inter-véhiculaire peuvent constituer indépendamment un support informationnel qui

pourrait être impliqué dans les régulations du comportement. Ces deux véhicules pouvaient se déplacer indépendamment à une vitesse constante, accélérer ou décélérer. Les résultats indiquaient que les participants étaient influencés essentiellement par la cinématique du véhicule de tête qui semblait jouer un rôle prépondérant dans les régulations de vitesse par rapport au véhicule suiveur. De plus, la variation de vitesse (i.e., accélération ou décélération) et de taille de l'ensemble de la fenêtre inter-véhiculaire au cours de la phase d'approche influençait également le comportement de conduite des automobilistes. En effet, les participants traversaient l'intersection en moyenne plus loin du véhicule de tête dans les conditions dans lesquelles l'ensemble de la fenêtre inter-véhiculaire accélérait ou était en contraction que dans les conditions dans lesquelles la fenêtre inter-véhiculaire décélérait ou était en expansion.

Dans l'ensemble, ces résultats indiquaient que, pour réaliser une tâche de traversée d'intersection, les participants percevaient les véhicules bornant la fenêtre inter-véhiculaire, à la fois comme deux entités distinctes et indépendantes mais aussi comme un tout. Ainsi, les automobilistes réalisaient un contrôle continu de leur déplacement tout au long de la phase d'approche grâce à la mise en œuvre de deux stratégies complémentaires pour effectuer des régulations de déplacement lors d'une traversée d'intersection (i.e., stratégie d'évitement de collision avec les deux bornes distinctes et stratégie d'interception avec la fenêtre inter-véhiculaire considérée comme un tout).

b. Contraintes environnementales

D'après l'étude de [Louveton, Bootsma et al. \(2012\)](#) ainsi que l'étude de [Louveton et al., \(soumis\)](#), la géométrie de l'intersection ainsi que la taille des véhicules constituant la fenêtre inter-véhiculaire seraient susceptibles d'influencer le comportement perceptivo-moteur des automobilistes à l'approche d'une intersection.

b.1. Facteur de la géométrie de l'intersection

Dans l'expérience de [Louveton, Bootsma et al. \(2012\)](#) et celle de [Louveton et al. \(soumis\)](#), les expérimentateurs ont manipulé la géométrie de l'intersection comme cela avait été fait pour les tâches de jugement (e.g., [Van Loon et al., 2010](#) ; [Manser & Hancock, 1996](#)). Dans cette étude les participants pouvaient être confrontés à une intersection en angle fermé, perpendiculaire ou ouvert (Figure 2.13). Les résultats ont indiqué que les participants régulaient leur vitesse d'approche en fonction des contraintes perceptives associées à la géométrie de l'intersection. En effet, dans les conditions où l'intersection présentait un angle fermé les conducteurs se déplaçaient à une vitesse plus faible et traversaient l'intersection plus loin du véhicule de tête que dans les conditions où la géométrie de l'intersection était en angle droit. A l'inverse, dans les conditions dans lesquelles l'intersection présentait un angle ouvert, les conducteurs se déplaçaient significativement à une vitesse plus importante et traversaient l'intersection plus proche du véhicule de tête que dans les conditions où l'intersection présentait une géométrie perpendiculaire. Une fois de plus, cette expérience montre que le conducteur met en œuvre un couplage perception-action afin de réaliser une traversée d'intersection. En effet, le patron comportemental indiquait que les déplacements des automobilistes, au cours de la phase d'approche, étaient

réalisés grâce à un contrôle continu du mouvement et non pas sur des prédictions de temps d'arrivée. De plus, ces résultats mettaient en évidence la similarité comportementale entre une tâche d'interception de mobile sur un plan horizontal et une tâche de traversée d'intersection du fait que les régulations de vitesse de déplacement observées étaient proches de celles obtenues par [Chardenon et al. \(2005\)](#).



Figure 2. 13 : Les trois géométries des intersections utilisées (i.e., [Louveton, Bootsma et al., 2012](#))

b.2. Taille des véhicules bornant la fenêtre inter-véhiculaire

Afin de tester une éventuelle mise en œuvre d'une stratégie d'interception pour effectuer des régulations [Louveton et al. \(soumis\)](#) ont manipulé la taille des véhicules croisés ainsi que leur expansion optique. Au cours de l'expérience les participants pouvaient croiser des véhicules de taille normale, des véhicules de grande taille (i.e., multipliée par 2) ou encore des véhicules de petite taille (i.e., multipliée par 0.5). De plus, la taille des véhicules croisés pouvait être soit statique tout au long de l'essai, soit être de grande ou petite taille et prendre progressivement une taille normale lors du franchissement de l'intersection. Dans cette étude les expérimentateurs ont voulu tester par défaut l'utilisation d'une stratégie basée sur l'utilisation du taux de changement de l'angle de relèvement. En effet les variables manipulées n'affectant pas le taux de changement de l'angle de relèvement, le

comportement de régulation devrait être le même dans toutes les conditions si cette stratégie était utilisée. Les résultats ont indiqué que le contrôle de la vitesse d'approche des automobilistes était influencé à la fois par la taille optique et par l'expansion optique des voitures. La vitesse moyenne de déplacement était réduite en présence de véhicules de grande taille ou de véhicules dont la taille augmentait en cours d'approche. Ces résultats invalident l'hypothèse d'une utilisation exclusive d'une stratégie basée sur la prise en compte du taux de changement de l'angle de relèvement.

c. Contraintes propres au couple conducteur-véhicule

La majorité des expériences réalisées sur les piétons et les cyclistes ont étudié le comportement perceptivo-moteur des usagers de la route en fonction de leur âge (i.e., [Lee, Young & McLaughlin, 1984](#) ; [Plumert et al., 2004](#) ; [Plumert et al., 2007](#) ; [Chihak et al., 2010](#) ; [Plumert et al., 2011](#) ; [Grechkin et al., 2013](#) ; [Chihak et al., 2014](#) ; [Plumert & Kearney, 2014](#) ; [Nikolas et al., 2016](#)). En effet, les études comparaient le comportement de traversées d'enfants (entre 6 et 14 ans) et d'adultes traversant une route avec un trafic dense et continu. Ces études révèlent une différence de performance sur une tâche de traversée de route entre les enfants et les adultes. Bien que les modèles de déplacement soient similaires chez les deux populations, les enfants (jusqu'à 12 ans) ne sont pas aussi habiles que les adultes. En effet ils ont des difficultés à se synchroniser avec la fenêtre inter-véhiculaire à intercepter. Ainsi, les enfants auraient conscience qu'il y a des corrections de vitesse à faire au cours de la phase d'approche et de traversée de la route (i.e., accélération ou décélération) mais ils semblent avoir des difficultés à quantifier les corrections nécessaires à la réussite de la tâche. Les enfants semblent avoir plus de difficultés à réguler leur vitesse de déplacement afin de coordonner leurs mouvements avec le déplacement d'autres véhicules

dans l'environnement. Ces résultats sont en accord avec une régulation continue du déplacement des participants pour une tâche de traversée d'intersection. En effet, selon le niveau de développement perceptivo-moteur de l'agent effectuant l'action celui-ci n'effectue pas les régulations avec la même précision.

Globalement les résultats des études réalisées sur le comportement de conduite des usagers de la route avec un déplacement actif afin de préserver le lien naturel liant perception et action ont utilisé, tout comme les études se servant d'un paradigme d'extrapolation du mouvement, un triptyque de contraintes (i.e., tâche, environnement, couple conducteur-véhicule). La manipulation de ces différentes contraintes a permis de mettre en évidence la nature progressive des régulations effectuées par les participants tout au long de la phase d'approche précédant la traversée d'une intersection. Les résultats semblent indiquer que les régulations effectuées par l'agent pour réaliser une tâche de traversée d'intersection et une tâche d'interception de mobile sur un plan horizontal sont similaires. Néanmoins, quelques différences importantes liées aux caractéristiques de la cible à intercepter (i.e., balle ou fenêtre inter-véhiculaire) ont été relevées (i.e., [Chihak et al., 2010](#) ; [Louveton et al., soumis](#)).

2.4. Problématique de ce travail

Nous avons vu au cours de ce chapitre que la traversée d'une intersection était très accidentogène de par sa complexité (i.e., fortes contraintes spatiales et temporelles). Pour réaliser cette tâche, le conducteur utiliserait des processus de haut niveau (i.e., identification des risques, tâche de navigation) et des processus de bas niveau (i.e., guidage visuel). Jusqu'à présent, la majeure partie des travaux présents dans la littérature se sont intéressés

à des processus de haut niveau (e.g., voir [Caird & Hancock, 2002](#)) pour une revue de littérature exhaustive). Ces études ont recensé un triptyque de contraintes susceptibles d'influencer le jugement perceptif des participants lors de la réalisation d'une manœuvre à une intersection. Or, il semblerait que la traversée d'intersection fasse partie des actions visuellement guidées (e.g., interception de balle, course d'élan pour effectuer un saut en longueur ou encore salto arrière de pied ferme) et fasse appel à des processus de bas niveau. Cela signifierait que pour réussir une manœuvre à une intersection les automobilistes ne se contenteraient pas de prédire le temps d'arrivée des véhicules qu'ils croisent. Ils réaliseraient un contrôle continu de leur déplacement (i.e., régulation de leur vitesse d'approche) à l'aide d'une information visuelle tout au long de la phase d'approche et de traversée de l'intersection.

Quelques travaux ont commencé à étudier les régulations de déplacement des cyclistes (e.g., [Plumert & Kearney, 2014](#)) et des automobilistes (e.g., [Louveton et al., soumis](#)) lors d'une tâche de traversée d'intersection. Ces études, encore peu nombreuses, ont manipulé le même triptyque de contraintes que les études précédentes afin d'observer d'éventuels comportements de régulation. Pour cela il a été demandé aux participants de traverser activement une intersection afin de préserver le lien naturel entre information et mouvement. Globalement, les résultats de ces études ont mis en évidence un comportement de régulation de la vitesse d'approche graduel, produit durant toute la phase d'approche et de traversée de l'intersection. De tels résultats indiquent que les conducteurs modulaient leur vitesse d'approche de façon continue tout en s'adaptant aux différentes contraintes rencontrées. Ces études avaient pour objectif d'identifier les mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent l'approche d'une traversée d'intersection. Notre thèse

s'inscrit dans le prolongement de ces études princeps ; elle vise une meilleure compréhension de ces mécanismes. Il s'agira plus précisément de parvenir à une meilleure description du support perceptif impliqué lors de la réalisation de la tâche de traversée d'intersection et d'identifier la présence éventuelle des marqueurs du couplage information-mouvement.

Dans la première étude, nous nous sommes focalisés sur l'identification du support perceptif utilisé afin de procéder à des régulations du déplacement lors de l'approche et de la traversée d'une intersection. Notre hypothèse de travail était que le support perceptif utilisé dans une tâche perceptive (i.e., jugement du temps d'arrivée d'un véhicule) n'était pas le même que celui utilisé une tâche perceptivo-motrice (i.e., approche et traversée effective d'une intersection).

Dans deux expériences distinctes nous avons analysé la manière avec laquelle des contraintes similaires (i.e., Offset, taille et type des véhicules) affectent les jugements des participants et la réalisation effective de la tâche de traversée. Ces expériences nous ont également permis de lever une ambiguïté méthodologique identifiée dans le cadre de notre revue de littérature. Nous avons ainsi remarqué que dans les différentes études destinées à analyser l'influence de la taille du véhicule croisé sur les jugements des conducteurs, les expérimentateurs avaient quasiment systématiquement manipulé le type de véhicule croisé (e.g., [Caird & Hancock, 1994](#)). La co-variation de la taille et du type de véhicule croisé ne permettait pas de distinguer les effets respectifs associés à chaque variable. Le deuxième objectif de cette étude était d'examiner l'influence de la taille et du type de véhicule croisé sur les deux tâches (i.e., jugement d'un temps d'arrivée et traversée active d'intersection), dans le but de désambiguïser le rôle de ces deux variables.

Dans la troisième étude, nous nous sommes focalisés sur l'identification des marqueurs indiquant la mise en œuvre d'un cycle information-mouvement lors de la réalisation d'une traversée d'intersection. Ainsi nous avons cherché à savoir si le déplacement des automobilistes gagnait en précision au cours de la réalisation de la tâche. Nous avons également tenté d'identifier une évolution opposée des patrons de variabilité inter-essais des variables de contrôle et d'ajustement. Pour cela nous avons manipulé des contraintes liées à la tâche à réaliser (i.e., Offset et temps d'arrivée de la fenêtre inter-véhiculaire sur l'intersection) ainsi qu'une contrainte liée au couple conducteur-véhicule (i.e., capacité d'accélération du véhicule conduit).

***Perception versus
Perception-Action***

Judging arrival times of incoming traffic vehicles is not a prerequisite for safely crossing an intersection: Differential effects of vehicle size and type in passive judgment and active driving tasks¹

Abstract

Using a fixed-base driving simulator we compared the effects of the size and type of traffic vehicles (i.e., normal sized or double-sized cars or motorcycles) approaching an intersection in two different tasks. In the perceptual judgment task, passively moving participants estimated when a traffic vehicle would reach the intersection for actual arrival times (ATs) of 1, 2, or 3 s. In line with earlier findings, ATs were generally underestimated, the more so the longer the actual AT. Results revealed that vehicle size affected judgments in particular for the larger actual ATs (2 and 3 s), with double-sized vehicles then being judged as arriving earlier than normal-sized vehicles. Vehicle type, on the other hand, affected judgments at the smaller actual ATs (1 and 2 s), with cars then being judged as arriving earlier than motorcycles. In the behavioral task participants actively drove the simulator to cross the intersection by passing through a gap in a train of traffic. Analyses of the speed variations observed during the active intersection-crossing task revealed that the size and type of vehicles in the traffic train did not affect driving behavior in the same way as in the AT judgment task. First, effects were considerably smaller, affecting driving behavior only marginally. Second, effects were opposite to expectations based on AT judgments: driver approach speeds were smaller (rather than larger) when confronted with double-sized

¹ Mathieu, J., Bootsma, R.J., Berthelon, C. et Montagne, G. (2017). Judging arrival times of incoming traffic vehicles is not a prerequisite for safely crossing an intersection: Differential effects of vehicle size and type in passive judgment and active driving tasks. *Acta Psychologica*, 173, 1-12.

vehicles as compared to their normal-sized counterparts and when confronted with cars as compared to motorcycles. Finally, the temporality of the effects was different on the two tasks: vehicle size affected driver approach speed in the final stages of approach rather than early on, while vehicle type affected driver approach speed early on rather than later. Overall, we conclude that the active control of approach to the intersection is not based on successive judgments of traffic vehicle arrival times. These results thereby question the general belief that arrival time estimates are crucial for safe interaction with traffic.

Introduction

According to the European Road Safety Observatory (www.erso.eu), during the year 2013 26,000 people were killed (and over a million injured) in road traffic accidents within the European Union. > 5300 fatalities (i.e., over 20%) were due to accidents at traffic junctions. The more accident-prone scenarios (representing nearly 30% of the traffic-junction fatalities) involved straight crossing paths, with other vehicles coming from either or both sides of the intersection. Factors associated with such accidents have been reported (e.g., [Caird & Hancock, 2002](#)) to include not only characteristics of the driver (such as age and gender) and the environment (such as setting and layout of the intersection), but also the perceptual and motor mechanisms implicated in driving tasks. Our work aims to provide a better understanding of these latter mechanisms when drivers perform an intersection-crossing task in the presence of incoming traffic. As already noted by [Louveton, Bootsma, Guerrin, Berthelon, and Montagne \(2012\)](#), the vast majority of work performed so far has focused on the capacity of drivers to judge when an approaching vehicle will reach a given location (e.g., [Berthelon & Mestre, 1993](#); [Caird & Hancock, 1994](#)) or to decide when a safe manoeuvre can be initiated (e.g., [Dewing, Duley, & Hancock, 1993](#); [Hancock, Caird, Shekhar, & Vercruyssen, 1991](#)). Experimentally, such judgments or decisions are typically obtained in settings requiring participants to provide a discrete response after viewing part of an approach event involving one or more vehicles. Several authors (e.g., [Caird & Hancock, 1994](#); [Gray & Regan, 2005](#)) have advocated the need for paradigms with higher ecological validity, allowing to preserve the natural links between perception and action that characterize the unfolding of the majority of driving maneuvers. There is in fact no guarantee that the results obtained using discrete-response motion-extrapolation paradigms can indeed be transferred

to driving tasks in which the continuous perceptual-motor dialog underlying the unfolding of the action is preserved. More precisely, adoption of these paradigms rests on the hypothesis that predictive assessment of an arrival time or a temporal gap is a prerequisite for safe behavioral interaction with the approaching vehicle(s). In this light, determining the capacity of a driver to make such predictive assessments under a wide range of conditions is then presumed to reveal not only the adequacy of the underlying mechanisms, but also the specific conditions leading to their deterioration. Following this line of reasoning, a large body of work has allowed identification of the main factors underlying poor prediction of a forthcoming event (e.g., [Dewing et al., 1993](#); [Hancock et al., 1991](#)). However, contrary to discrete judgment or decision tasks, the control of a time-evolving action is not necessarily based on some form of predictive assessment. Indeed, a large number of studies, notably in the domain of interception, have revealed that the control of action can be based on prospective information. Rather than relying on predictions about when a moving object will be where, interceptive actions may be regulated with respect to particular current states of the agent-environment interaction that guarantee (i.e., are lawfully related to) the future achievement of the goal (e.g., [McLeod & Dienes, 1993](#); [Lenoir et al., 1999](#); see [Montagne, 2005](#) for a review). One can wonder to what extent the same kind of information could be used when drivers intercept an inter-vehicular gap.

Whereas the discrete-response motion-extrapolation paradigm has been used in many studies to better understand the underlying perceptual processes, to our knowledge only a few studies decided to preserve the perceptual-motor dialog when studying intersection-crossing behavior. The work of [Chihak et al. \(2010\)](#), [Chihak, Grechkin, Kearney, Cremer, and Plumert \(2014\)](#) and that of [Louveton, Bootsma, et al. \(2012\)](#) and [Louveton, Montagne, Berthelon, and Bootsma \(2012\)](#) constitute rather isolated attempts to study

intersection-crossing behavior without separating the perceptual-motor mechanisms involved. While the former were interested in the perceptual-motor developmental changes accompanying the intersection-crossing behavior of cyclists, the latter focused on the mechanisms underlying the intersection-crossing behavior of adult drivers. Calling upon the same type of virtual environment technology, the tasks studied required participants to regulate their speed of approach to an intersection so as to safely pass through an incoming traffic gap. Both groups shared the idea that, rather than trying to isolate particular components, intersection-crossing behavior should be studied as a whole in order to reveal the underlying mechanisms. A general finding of these studies was that functional (i.e., situation-appropriate) speed changes were observed over the entire approach phase, allowing participants to cross the inter-vehicular gap near its center, at a position slightly shifted towards the lead vehicle (e.g., [Chihak et al., 2010](#); [Louveton, Bootsma, et al., 2012](#)). While consistent with an on-line, prospective control of the approach to the intersection, the observed gradual and functional speed adjustments seem to fit less well with expectations derived from arrival time (AT) judgments. Indeed, not only do AT judgments generally give rise to underestimations of actual AT, but the magnitude of the underestimation is known to be larger for longer actual ATs (e.g., [Caird & Hancock, 1994](#); [Schiff & Detwiler, 1979](#)). Thus, even during an approach to an intersection that does not require a change in speed to ensure safe crossing (that is, passing near the center of a gap between two incoming traffic vehicles), early estimates of time remaining until arrival of the traffic vehicles at the intersection would be considerably shorter than the actual ATs. Such underestimations of actual AT would be expected to give rise to an increase in speed. As actual AT decreases over the course of the approach, judgments would become more precise (less underestimated) and speed would therefore be expected to gradually decrease to more appropriate levels.

The speed profiles described by [Chihak et al. \(2010, 2014\)](#), [Louveton, Bootsma, et al. \(2012\)](#) and [Louveton, Montagne, et al. \(2012\)](#) did not show such characteristics.

Moreover, several studies have demonstrated that perceptual processes operate more accurately within a perceptual-motor task than in a purely perceptual task (e.g., [Bootsma, 1989](#); [Gray & Regan, 2005](#); [Mann, Abernethy, & Farrow, 2010](#); [Oudejans, Michaels, & van Dort, 1996](#)). In the study by [Bootsma \(1989\)](#) participants experienced more difficulties (i.e., larger variability) in judging arrival time of a moving ball than in initiating a movement to strike it. Comparably, [Gray and Regan \(2005\)](#) reported more appropriate decisions when drivers overtook a moving vehicle than when they had to judge the opportunity to initiate a safe overtaking maneuver. Thus, the magnitude of underestimation generally observed in AT judgment tasks may be attenuated during an active intersection-crossing task. Of course, such an attenuation effect may already have consequences for the generality of the conclusions drawn from the often-used judgment tasks.

The present contribution builds on the framework developed by [Chihak et al. \(2010, 2014\)](#), [Louveton, Bootsma, et al. \(2012\)](#) and [Louveton, Montagne, et al. \(2012\)](#), with the ambition to more directly test the hypothesis that the perceptual substrate underlying judgments of arrival time of a vehicle moving towards an intersection is (at least partly) distinct from the perceptual substrate underlying the active control of one's own approach to that same intersection. For that purpose, we compared the influence of a given set of experimental manipulations (specifically, the size and type of the vehicles encountered at the intersection) on both perceptual (i.e., AT judgment, Experiment 1) and perceptual-motor (i.e., active intersection crossing, Experiment 2) tasks. Vehicle size is known to affect AT judgments: larger vehicles are judged to arrive earlier than smaller vehicles (e.g., [Eberts & MacMillan, 1985](#); [De Lucia, 1991](#); [Dewing et al., 1993](#); [De Lucia & Warren, 1994](#); [Caird &](#)

[Hancock, 1994, 2002](#); see [De Lucia, 2013](#) for a review). If active intersection crossing would (at least partly) share the perceptual substrate underlying AT judgments, the size of the vehicles encountered should affect behavior on both tasks in similar ways. However, before further examining the effects expected, a closer look at the way size has been experimentally manipulated is warranted.

Indeed, many of the studies attributing the observed increase in AT underestimation to increases in vehicle size in fact manipulated vehicle type at the same time. In the experiment by [Horswill, Helman, Ardiles, and Wann \(2005\)](#), for example, participants were asked to make AT judgments for different vehicles approaching a junction. The different vehicles examined included a small motorbike, a large motorcycle, a car and a van. The larger AT underestimations recorded for both the car and the van, in comparison to the motorbikes, were said to result from the increase in size of the approaching vehicle. Unfortunately, the simultaneous variation of two dimensions (i.e., vehicle size and vehicle type) does not allow their respective effects to be disambiguated. This methodological confounding of size and type is all the more worrisome as recent experiments have indicated that the type per se of an approaching object influences AT judgments: [Brendel, De Lucia, Hecht, Stacy, and Larsen \(2012\)](#) demonstrated that threatening pictures were judged as arriving earlier than neutral pictures, but also that ATs of angry faces were underestimated (see [Brendel, Hecht, De Lucia, & Gamer \(2014\)](#), for a discussion focusing on the underlying mechanisms). As a consequence, the type of vehicle approaching an intersection is likely to affect AT estimates as well as the vehicle's size. There is a need to control these factors experimentally to disambiguate their respective effects.

Our study therefore has two objectives. The main objective is to test whether the perceptual substrate underlying AT judgments is comparable to the perceptual substrate underlying active intersection crossing tasks. The second related objective, is to examine the influence of both the size and the type of the vehicles encountered on the two tasks (i.e., perceptual vs. perceptual-motor tasks), with the objective of disambiguating the role of these factors.

Based on the previous work described above, the following hypotheses can be formulated. In the judgment task of Experiment 1 arrival time of the vehicles encountered should generally be underestimated and the underestimation should be greater for longer actual ATs. More importantly for the present purposes, both the size and the type of the vehicles encountered should influence AT judgments. The underestimation in AT judgments should be greater for larger-sized vehicles (size effect) and for more threatening vehicles (type effect). If the active intersection-crossing task of Experiment 2 were to rely on a perceptual substrate similar to that of the AT judgment task, equivalent manipulations of size and type of the vehicles encountered should influence driving speed during approach to the intersection in a predictable way. The use of successive AT estimates to control speed to pass through an inter-vehicular gap should lead the participants to adopt somewhat higher speeds when confronted with larger-sized and/or more threatening vehicles. The phase of approach expected to be most affected by the size and type manipulations depends on the relations between the magnitude of each of these effects on AT estimates and actual AT. Experiment 1 will allow determining the time-dependence of these effects.

On the other hand, the perceptual substrate underlying the two tasks (i.e., AT judgment and active intersection crossing) could in fact be different and the use of prospective information during active intersection crossing should favor the appearance of

functional speed changes. In the case predictive information (i.e., AT estimates) would not be involved in the speed regulation process, there is no reason to expect the type of adjustments described above. Gradual functional speed changes should appear when necessary. In this perspective effects of vehicle size and type might still occur (affecting, for instance, the position in the inter-vehicular gap chosen for crossing) but, if at all existent, would not be expected to demonstrate the same time-dependency as observed in the AT judgment task.

General methods

Participants

Fourteen young adults, six women and eight men (26.7 ± 3.8 years old; $M \pm SD$) with normal or corrected to normal vision, volunteered for participation in both experiments. They all held a driver's license for at least three years. Participants provided written consent prior to the study, which was conducted according to IFSTTAR regulations and the Declaration of Helsinki.

Apparatus and visual environment

In both experiments participants sat in the driver seat of a fixed-base SIDROH driving simulator, based on a Renault Megane II (see Fig. 3.1, top panel). They could interact with the car using its standard equipment, including the steering wheel and a set of clutch, footbrake and accelerator pedals. The driving simulator implemented an automatic transmission so that participants did not have to shift gears while driving. The audio-visual environment was generated using the ARCHISIM traffic model ([Espie & Auberlet, 2007](#)).

Using three Epson 485W projectors operating at 60 Hz, the visual scene was presented on three planar (1.8-m high by 1.35-m wide) 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°. In order to improve immersion in the scene, the virtual environment was also presented in the side and rear-view mirrors. The participant's viewpoint was situated 1.2 m above the ground at a distance of 2.2 m from the frontal projection screen. A quadraphonic sound system presented sounds from inside (e.g., engine, tires, start engine) and outside (e.g., engines of crossed vehicles) the car. The simulated environment consisted of a straight textured road, with two lanes for opposing traffic separated by intermittent white lines, running through a flat rural environment (see Fig. 1, bottom panel). The road followed by the participant was orthogonally intersected by a similar second road over which a single vehicle (Experiment 1) or a train of vehicles (Experiment 2) could approach the intersection from the left. In Experiment 1 the participant was passively transported towards the intersection and had to judge when the other vehicle would reach the intersection. In Experiment 2 the participant actively drove the simulator car so as to cross the intersection by passing through a gap in the train of traffic. Each participant completed the two experiments within the same half day, with experimental sessions being separated by a 15 min rest period. Each experiment consisted of both a familiarization phase (3 min for Experiment 1, 8 min for Experiment 2) and an experimental phase (30 min for both experiments). The order of passage of the two experiments was counterbalanced over participants, such that 7 participants performed Experiment 1 before Experiment 2 and 7 others performed Experiment 2 before Experiment 1. In both Experiments each trial started with the participant moving at a speed 16 m/s, from initial distances of 72, 88, and 104 m

from the intersection. Participants always moved in the right lane of the road. Data were collected at a 60 Hz sampling frequency.

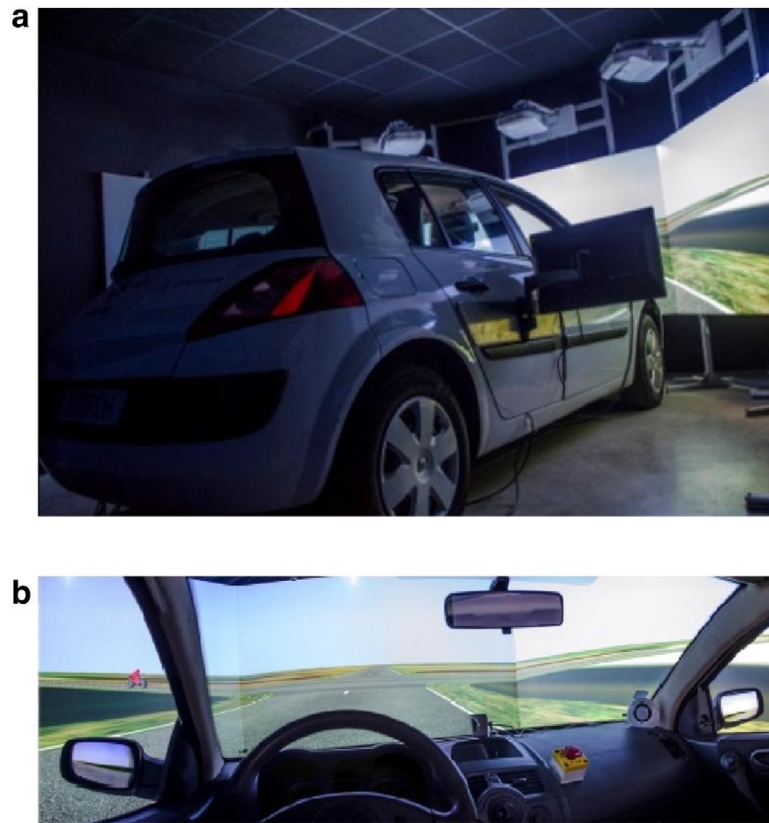


Figure 3. 1 : *Illustration of the exterior view of the driving simulator with the three projectors and screens (a) and participant view from inside the simulator (b). The visual scene is presented on the three screens as well as in the side and rear-view mirrors. The task was to estimate when the approaching motorcycle would have arrived at the intersection after disappearance of the visual scene.*

Experiment 1: judging vehicle arrival time

Task and experimental design

During passive approach to the intersection, the participant was confronted with a vehicle approaching the intersection via the other road. After an exposure duration depending on the experimental conditions, the full visual scene disappeared and all screens became blank. The participant's task was to estimate when the approaching vehicle would have arrived at

the intersection (precisely, at the midline of the participant's road) by pulling the horizontal lever protruding from the left side of the steering column (normally used for flashing the lights). In order to study the effects of vehicle type and vehicle size independently, we created 3D models of a car and a motorcycle-with-driver of identical physical outline dimensions. The normal-sized vehicles were 2.4 m long, 1.27 m wide and 1.7 m high. The double-sized vehicles were twice as large, 4.8 m long, 2.54 m wide and 3.4 m high. Both vehicles were colored red except for the wheels and tires that were respectively gray and black.

Moving at 10 m/s the stimulus vehicle could start at distances of either 40 or 50 m from the intersection, corresponding to vehicle travel durations to the intersection of 4 or 5 s. Moving at 16 m/s participants could start at distances of either 72, 88, or 104 m from the intersection, corresponding to participant travel durations to the intersection of 4.5, 5.5, or 6.5 s. The approach to the intersection was visible during either 2 or 3 s. The stimulus vehicle was thus at distances of 30, 20, or 10 m from the intersection when the visual scene disappeared. For the constant vehicle speed of 10 m/s, these distances corresponded to 3, 2, and 1 s until arrival at the intersection. The initial and final visual eccentricities of the stimulus vehicle with respect to the participant's direction of motion varied over conditions, due to the combination of different stimulus vehicle starting distances (2), different exposure durations (2) and different participant starting distances (3).

Procedure

During a short familiarization phase prior to the experiment proper both the participant and the stimulus vehicle moved at speeds of 12 m/s. In the first two familiarization trials the stimulus vehicle remained visible over the full period of approach to

the intersection and the participant had to pull the lever when the stimulus vehicle's front bumper crossed the center of the intersection. In the following two familiarization trials, the stimulus vehicle disappeared 0.5 s before reaching the intersection and the participant had to pull the lever when s/he estimated that the stimulus vehicle would have arrived at the same location. Performance on these familiarization tasks was quite precise: Participants pulled the lever on average -0.02 ± 0.08 s before the actual arrival time of the vehicle in the full-visibility condition and 0.02 ± 0.15 s after the actual arrival time of the vehicle in the 0.5-s disappearance condition.

During the experimental phase participants performed five blocks of trials, for a total of 240 trials. In each block of trials all 48 experimental conditions, resulting from the combination of the factors vehicle type (2), vehicle size (2), initial vehicle distance (2), exposure duration (2) and initial participant distance (3), were presented once in a randomized order. Only initial stimulus vehicle distance and exposure duration influenced the actual time remaining (1, 2, or 3 s) until the stimulus vehicle reached the intersection.

Data analysis

For each trial the difference between the actual moment of arrival of the stimulus vehicle at the intersection and the participant's estimation of this moment, indicated by activation of the lever command, was determined. For each modality of stimulus vehicle arrival time (1, 2, and 3 s) we calculated, for each participant under each of the four vehicle type and size combinations separately, average estimated arrival time as well as the constant, absolute and variable estimation errors ([Schmidt & Lee, 2005](#)). The latter dependent variables were analyzed using repeated-measures ANOVAs with factors vehicle type (car or motorcycle), vehicle size (normal-sized or double-sized) and arrival time (1, 2, or

3 s). When Mauchly's test revealed violations of the sphericity assumption, Greenhouse-Geisser corrections were applied. Significance level was set at $\alpha = 0.05$. When appropriate, post-hoc analyses were performed using Scheffé tests.

Results

Fig. 3.2 presents the average arrival time judgments as a function of actual stimulus vehicle arrival time. Visual inspection revealed that AT was generally underestimated for occlusion durations exceeding 1 s, with longer actual ATs (i.e., longer occlusion durations) giving rise to larger underestimations as well as more variability in the judgments. Furthermore, both the size and the type of stimulus vehicle appeared to influence the AT judgments (although vehicle size affected judgments more strongly than vehicle type): Participants underestimated AT to a larger extent when confronted with double-sized vehicles than when confronted with normal-sized vehicles and participants underestimated AT to a lesser extent when confronted with a motorcycle than when confronted with a car. These observations were corroborated by the statistical analyses of the constant, absolute and variable judgment errors.

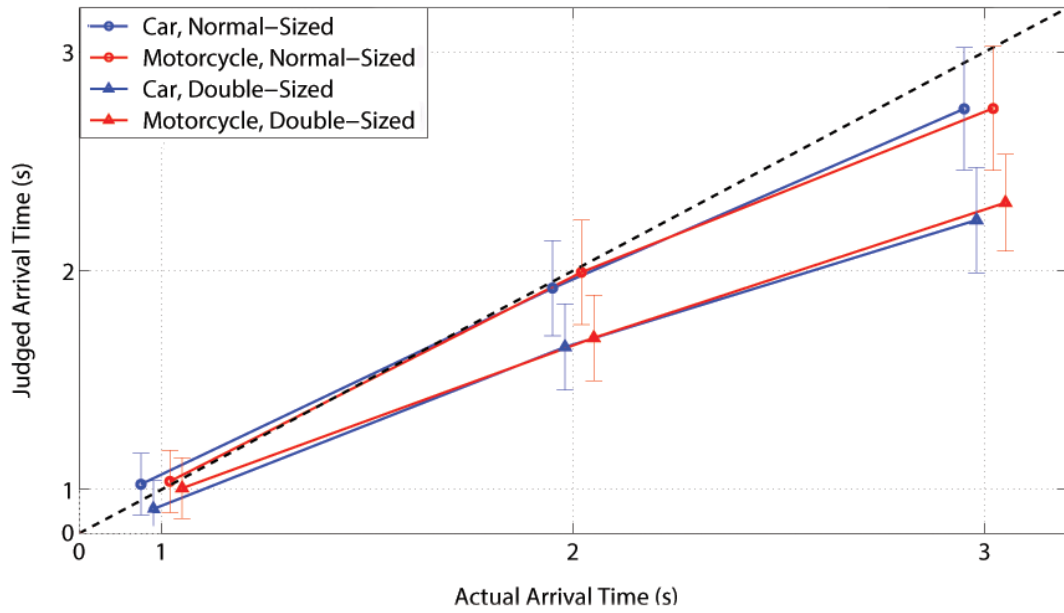


Figure 3. 2 : Average judged arrival time as a function of actual arrival time for the four vehicle size and vehicle type conditions. The dotted black line indicates equivalence. Error bars indicate average within-participant standard deviations.

Constant Error

The ANOVA on Constant Error (CE) in the participant's estimation of vehicle arrival time revealed significant main effects of the factors arrival time ($F(1.37, 17.87) = 53.07, p < 0.001, \eta^2_p = 0.80$), vehicle type ($F(1, 13) = 12.78, p < 0.01, \eta^2_p = 0.50$) and vehicle size ($F(1, 13) = 121.57, p < 0.001, \eta^2_p = 0.90$), a first-order interaction between vehicle size and arrival time ($F(1.44, 18.68) = 37.05, p < 0.001, \eta^2_p = 0.74$), as well as a second-order interaction between vehicle type, vehicle size and arrival time ($F(1.90, 24.65) = 3.45, p < 0.05, \eta^2_p = 0.21$). This complex pattern of results indicated that both vehicle type and vehicle size affected CE but not in the same way for each arrival time (Fig. 3.3a). We therefore ran separate ANOVAs with factors vehicle type and vehicle size at each level of arrival time.

For an arrival time of 1 s, significant main effects were observed for vehicle type ($F(1, 13) = 13.21, p < 0.01, \eta^2_p = 0.50$) and vehicle size ($F(1, 13) = 17.92, p < 0.001, \eta^2_p = 0.58$) together with a significant interaction between vehicle type and vehicle size ($F(1, 13) = 6.63,$

$p < 0.05$, $\eta^2_p = 0.34$). Post-hoc analysis of the interaction indicated that the normal-sized car gave rise to a slight overestimation of arrival time while the double-sized car gave rise to a slight underestimation ($p < 0.05$). No such an effect of vehicle size was observed for the motorcycle, with both sizes leading to CE's similar to that observed for the normal-sized car. For an arrival time of 2 s, significant main effects were observed for both vehicle type ($F(1, 13) = 9.11$, $p < 0.01$, $\eta^2_p = 0.41$) and vehicle size ($F(1, 13) = 79.33$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.86$). The interaction was not significant ($p > 0.1$, $\eta^2_p = 0.07$). The normal-sized vehicles gave rise to, respectively, a small underestimation of arrival time for the car and a very slight overestimation for the motorcycle. A similar difference in CE's was observed for the double sized vehicles, with larger underestimations for the car than for the motorcycle. For an arrival time of 3 s, arrival time was systematically underestimated (all CE's negative) and revealed a significant main effect of vehicle size only ($F(1, 13) = 78.92$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.86$; other effects all $p > 0.1$ and, $\eta^2_p < 0.03$). For both the car and the motorcycle, double-sized vehicles gave rise to larger underestimations of arrival time than their normal-sized counterparts.

Absolute Error

The ANOVA on Absolute Error (AE) in the participant's estimation of vehicle arrival time revealed significant main effects of the factors arrival time ($F(1.14, 14.83) = 59.33$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.82$) and vehicle size ($F(1, 13) = 6.17$, $p < 0.05$, $\eta^2_p = 0.32$), first-order interactions between vehicle size and arrival time ($F(1.78, 23.15) = 15.75$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.55$) and vehicle type and vehicle size ($F(1, 13) = 5.21$, $p < 0.05$, $\eta^2_p = 0.29$), as well as a second-order interaction between vehicle type, vehicle size and arrival time ($F(1.89, 24.55) = 4.38$, $p < 0.05$, $\eta^2_p = 0.25$). As for CE, this complex pattern of results indicated that both

vehicle type and vehicle size affected AE but not in the same way for each arrival time (Fig. 3.3b). To clarify the effects of vehicle type and vehicle size we therefore again ran separate ANOVAs with factors vehicle type and vehicle size at each level of arrival time.

For an arrival time of 1 s, no effects on AE of vehicle type or vehicle size ($p < 0.1$, $\eta^2_p < 0.05$) were observed. For an arrival time of 2 s, the interaction between vehicle type and vehicle size was significant ($F(1, 13) = 16.21$, $p < 0.01$, $\eta^2_p = 0.55$). Post-hoc analysis of the interaction revealed that AE was larger for the double-sized car than for the normal-sized car ($p < 0.05$). No such size-effect was observed for the motorcycle. AE tended ($p = 0.051$) to be larger for the normal-sized motorcycle than for the normal-sized car. For an arrival time of 3 s, AE was influenced by vehicle size only ($F(1, 13) = 15.96$, $p < 0.01$, $\eta^2_p = 0.55$; other effects all $p > 0.1$ and $\eta^2_p < 0.11$). AE was larger for both the double-sized car and motorcycle than for their normal-sized counterparts.

Variable Error

The ANOVA on Variable Error (VE) in the participant's estimation of vehicle arrival time revealed significant main effects of the factors arrival time ($F(1.38, 17.93) = 55.97$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.81$) and vehicle size ($F(2, 26) = 42.61$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.77$). No other effects reached significance (all $p > 0.1$ and $\eta^2_p < 0.18$). Post-hoc analysis of the arrival time effect revealed that VE was larger ($p < 0.001$) for an arrival time of 3 s than for arrival times of 1 s and 2 s (Fig. 3.3c). Moreover, VE was larger for both the normal-sized car and motorcycle than for their double-sized counterparts.

Perception versus Perception-Action

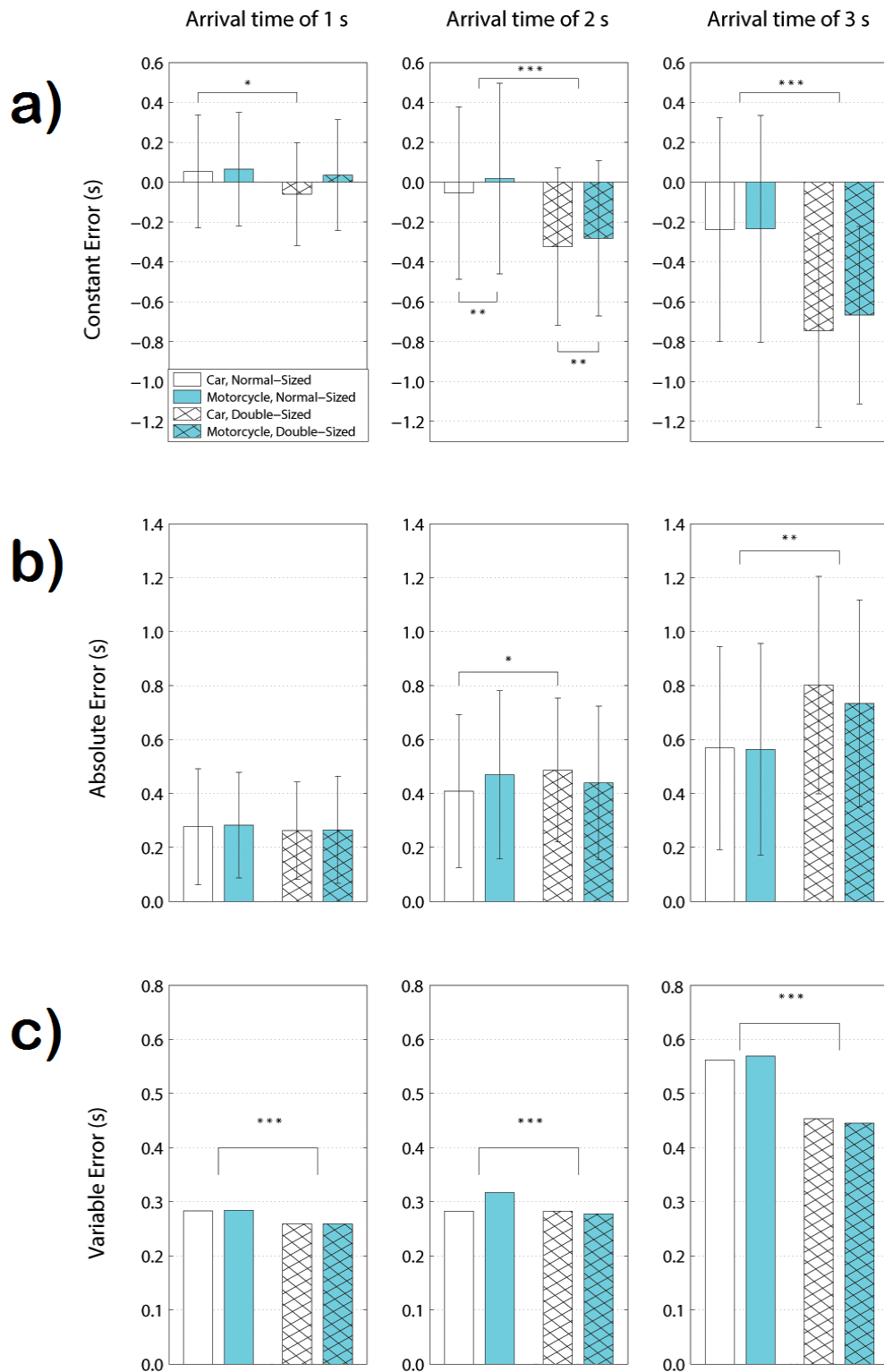


Figure 3.3 : Constant Error (a), Absolute Error (b) and Variable Error (c) in participants' estimates of vehicle arrival time for the 1-s (left column), 2-s (middle column) and 3-s (right column) arrival time conditions. *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$ and * $p < 0.05$ significant differences. Error bars indicate average within-participant standard deviations.

Discussion

The aim of this first experiment was to disambiguate and qualify the effects of actual AT, vehicle size and vehicle type on AT judgments. We will first examine the influence of actual AT on the participants' judgments, before analyzing the respective impact of the variables of interest (i.e., size and type) on the perceptual task.

Actual AT effects

Longer ATs were judged with less precision, as evidenced by the increase in AE with increasing actual AT (on average, 0.27, 0.45, and 0.68 s for actual ATs of 1, 2, and 3 s, respectively). In line with the literature (e.g., [Schiff & Detwiler, 1979](#); [McLeod & Ross, 1983](#); [Cavallo & Laurent, 1988](#); [Schiff & Oldak, 1990](#)) this effect resulted from the combination of both an increasing underestimation (CE) and an increasing variability (VE) in the judgments of longer actual ATs. While the interpretation of these results in terms of interval timing falls outside the scope of the present contribution (see [Gibbon, 1977](#) and [Mattel & Meck, 2000](#)), we note that the similarity of the results obtained in our study, in comparison with the results reported in the literature, is an important methodological step in validating our protocol. We can now address the influence of vehicle size and vehicle type on AT judgments.

Size and type effects

The size of the approaching vehicle was found to systematically affect AT judgements. Double-sized vehicles gave rise to larger errors than normal-sized vehicles, in particular for the larger actual AT's (i.e., 2 and 3 s). In these conditions, compared to their normal-sized counterparts, double-sized vehicles led participants to underestimate AT by an

extra 0.28 s in the 2-s AT condition and an extra 0.50 s in the 3-s AT condition. The size of the approaching vehicle also affected Variable Error, with normal-sized vehicles giving rise to larger errors than double-sized vehicles. This pattern of results confirms the influence of the size of the approaching vehicle on perceptual judgments reported in the literature on numerous occasions (cf., [De Lucia, 2013](#)). While previous studies confounded the effects of vehicle size and type (e.g., [Caird & Hancock, 1994, 2002](#); [Dewing et al., 1993](#); [Horswill et al., 2005](#)), our experimental protocol, designed to disambiguate these effects, allowed us to ascertain that it was the size of the approaching vehicle per se that influenced the judgments of the participants. It also allowed us to highlight the influence of the type of approaching vehicle on the judgment of the participants. While not present in the 3-s AT condition, an effect of vehicle type appeared in the 2-s AT condition, characterized by a systematically larger AT underestimation for cars than for motorbikes. The observation that the average difference was a modest 0.06 s indicates that the effect of the type of vehicle is not as strong as the effect of the size of the vehicle. Finally our results also demonstrated that in the shorter AT conditions size and type interacted, with size affecting judgments for cars but not for motorcycles (for AE in 2-s AT condition and for CE in 1-s AT condition).

Overall, the present results therefore confirmed that the precision of AT judgments decreases (i.e., increasing underestimation and larger variability) when actual AT increases. Most interestingly for the present purposes, both the size and the type of an approaching vehicle were found to influence perceptual judgments of its arrival time, but not in the same way. Vehicle size affected AT judgments more for larger actual ATs. Thus, under the hypothesis that the regulation of approach to the intersection during active intersection crossing is (at least partly) related to successive AT judgments, early on during the approach drivers would be expected to adopt a somewhat higher speed when confronted with larger-

sized incoming vehicles than when confronted with normal-sized incoming vehicles. This vehicle-size effect on driver speed should gradually diminish over the course of the approach, as AT judgments become less and less affected by vehicle size with decreasing actual AT. As expected ([Brendel et al., 2012, 2014](#)), vehicle type was also found to affect AT judgments, albeit overall to a lesser extent than vehicle size. Contrary to the effect of vehicle size, no effect of vehicle type was observed at the largest (3-s) actual AT tested; its influence only appeared at the shorter actual ATs, with cars generally being judged to arrive earlier than motorcycles. Thus, according to the same logic as developed for the expected effects of vehicle size, during the last seconds of active approach to an intersection drivers should adopt slightly higher speeds when confronted with incoming cars than when confronted with incoming motorcycles. In Experiment 2, we tested these hypotheses by analyzing the influence of vehicle size and type on an active intersection-crossing task.

Experiment 2: passing through a gap in a train of traffic

Task and experimental design

In Experiment 2 the participant actively drove the simulator. The task and procedure were similar to that of [Louveton, Bootsma, et al. \(2012\)](#) and [Louveton, Montagne, et al. \(2012\)](#), except that in the present experiment the simulator had a larger accelerative capacity. In Louveton et al.'s parameterization of the simulator reaching a speed of 100 km/h required 15.7 s of full acceleration. Here it required only 5.1 s, providing participants with a larger range of speed regulation capabilities. In order to familiarize the participants with the simulator, they first performed a following task, consisting of attempting to remain at a constant distance (corresponding to two segments of the intermittent central lane division markings) behind a car moving in front. The latter changed speed regularly, moving at 13.9, 16.7 or 19.4 m/s (corresponding to 50, 60 or 70 km/h) during 4, 6, or 8 s periods. Speed levels and durations were randomly combined into a sequence of 8 min. This exercise forced participants to accelerate, decelerate and maintain a constant speed, thereby allowing them to discover the action capabilities of the simulated vehicle driven. Following this familiarization phase and a short break, the experimental phase was started.

In the experimental phase, the participants' task was to safely cross the intersection. 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. This traffic train consisted of a truck, two red vehicles and another truck (see Fig. 3.4, lower panel).

Participants were to cross the intersection using the 27-m (i.e., 2.7-s) gap between the two red vehicles. In the absence of any traffic signs, no information with respect to priority was provided. The four-vehicle traffic train always moved in such a way that the center of the traffic gap (between the two red vehicles as measured by the distance

between the lead vehicle's rear end and the trail vehicle's front end) arrived at the middle of the driver's lane 5.5 s after the beginning of the intersection scenario. In the rare case that the driver collided with one of the traffic vehicles a large red triangle was presented.

Three aspects of the situation were experimentally manipulated: the type of vehicle in the traffic train, the size of the vehicles in the traffic train and the initial position of the participant driving the simulator. Vehicle type and vehicle size corresponded to those used in Experiment 1: Vehicles could be cars or motorcycles and vehicles could be normal-sized or doubled-sized.

The participant's initial distance from the intersection was manipulated 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 center of the traffic gap. To this end, the distance remaining to the intersection was set to 72, 88, or 104 m at the moment the participant had stabilized the car's speed (see below). Continuing at the stabilized speed of 16 m/s would have the participant arrive at the intersection with a temporal offset of +1 s (early offset), 0 s (no offset), or -1 s (late offset) with respect to the center of the traffic gap. Note that the Early and Late Offsets still allowed safely passing the intersection, as lead and trail vehicles were separated by a 2.7-s time gap.

At the beginning of each trial, participants were parked in the middle of their lane, without any other vehicles in sight. They started the car's engine and operated the pedals in order to attain the required velocity of 16 m/s indicated by a horizontally-oriented speedometer placed directly in front of them. Their current speed was indicated by the position of a black vertical line on a speed gauge and the required speed by a vertically-elongated rectangular zone, without any numerical information being provided (Fig. 3.4, upper panel). When the car's speed was within the delimited zone the gauge was green;

when it was outside the delimited zone the gauge was red. 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 ± 0.55 m/s = 57.6 ± 2.0 km/h) over the last 20 m of the 80-m stretch, the speed gauge disappeared and the intersection scenario was started, with the four-vehicle traffic train appearing on the left. If not, the trial was restarted. Note that the presence of the gauge during the preparatory phase was in fact a methodological stratagem allowing us to standardize the initial conditions from trial to trial (at the onset of the intersection scenario) while at the same time providing the participants with active control of their speed. Because the gauge disappeared when the intersection scenario was started it cannot have interfered with the driver's behavior during the approach to the intersection.

During the experimental phase participants performed five blocks of trials for a total of 60 trials. In each block of trials all 12 experimental conditions, resulting from the combination of the factors vehicle type (2), vehicle size (2) and the initial position of participant driving simulator (3), were presented once in a randomized order.

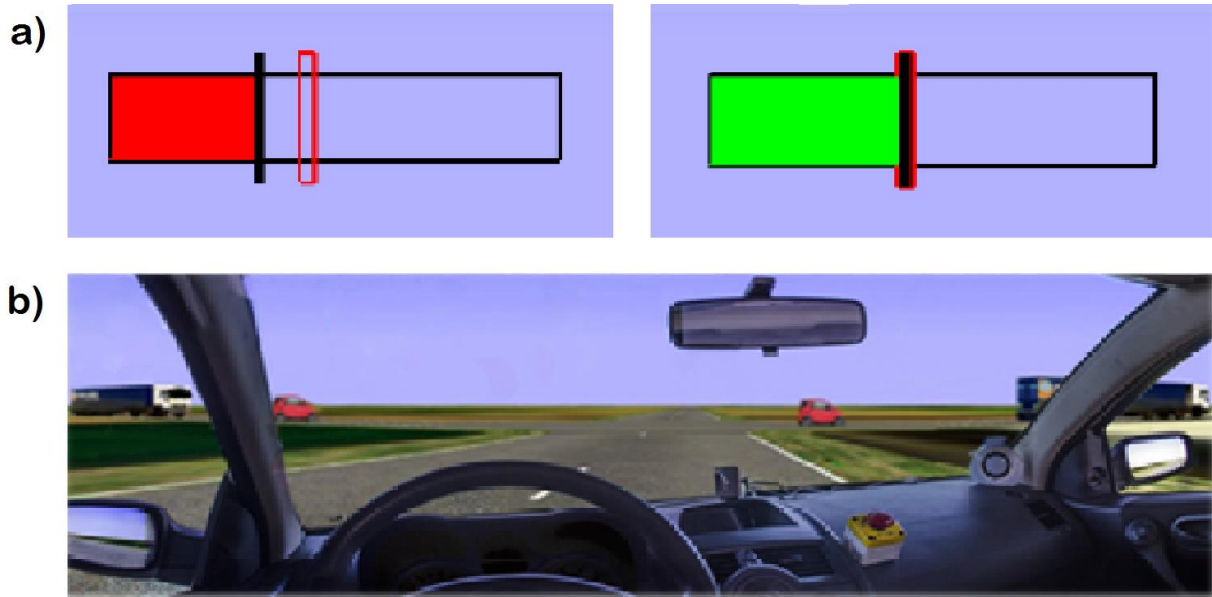


Figure 3. 4 : *Illustration of the speed gauge displayed in the center of the visual field to help participants stabilize speed prior to onset of the intersection crossing scenario (a). The gauge presented on the left indicates that current speed is too low, while the gauge presented on the right indicates that current speed is within the required zone. Participant's view of the intersection with the traffic train consisting of two trucks surrounding two red vehicles (here two cars) separated by a 27-m gap (b). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)*

Data analysis

Intersection crossing was analyzed via the position of the participant within the traffic gap at the moment of crossing. Taking the center of the gap as the reference, a negative crossing position indicated crossing after the center of the gap (i.e., closer to the trail vehicle) while a positive crossing position indicated crossing before the center of the gap (i.e., closer to the lead vehicle). In order to examine the nature of the speed adjustments effected during approach to the intersection, we analyzed the time course of participant's speed and its instantaneous effect on future passing position within the traffic gap, allowing a functional interpretation of the observed speed adjustments. The latter was operationalized through the current deviation (CD) from the traffic gap center, calculated as the time (distance) from the center of the traffic gap at which the participant would pass the

intersection if the current speed were to remain constant from thereon. In the no offset condition, continuing at the initial (stabilized) speed would lead the participant to pass right in the center of the traffic gap. Thus, at the start of a no offset trial, the temporal (spatial) CD was equal to 0 s (0 m). In the late offset condition, continuing at the initial speed would lead the participant to pass 1 s (10 m) behind the center of the traffic gap. Thus, at the start of a late offset condition CD was -1 s (-10 m). In the early offset condition, continuing at the initial speed would lead the participant to pass 1 s (10 m) in front of the center of the traffic gap. Thus, at the start of an early offset trial CD was +1 s (+10 m).

The time courses of speed and current deviation were analyzed in Time Steps, by averaging each of these variables over 1-s intervals synchronized with the final moment of passing the intersection. Given the relatively high speeds adopted by the participants in the present study, they often reached the intersection within <5 s. Average speeds and current deviations could therefore only be calculated over four Time Steps (i.e., 1-s intervals around 3.5, 2.5, 1.5, and 0.5 s before the participant arrived at the intersection).

Statistical analyses were performed using repeated-measures ANOVAs. The temporally-defined position in the traffic gap at the moment the participant crossed the intersection was analyzed with the factors vehicle type (cars or motorcycles), vehicle size (normal-sized or double-sized) and offset (early, no, late). For speed and temporally-defined current deviation similar 3-way ANOVAs were conducted at each Time Step (3.5, 2.5, 1.5 or 0.5 s before crossing) in order to facilitate interpretation of the results. When Mauchly's test revealed violations of the sphericity assumption, Greenhouse-Geisser corrections were applied. Significance level was set at $\alpha = 0.05$. When appropriate post-hoc analyses were performed using Scheffé tests.

Results

Gap crossing position

The ANOVA on gap crossing position revealed significant main effects of the factors offset ($F(1.26, 16.42) = 55.19, p < 0.001, \eta^2_p = 0.81$) and vehicle size ($F(1, 13) = 14.43, p < 0.01, \eta^2_p = 0.53$). The main effect of vehicle type was not significant ($p > 0.1, \eta^2_p = 0.15$), nor were any of the interactions (all $p > 0.1$ and $\eta^2_p < 0.10$).

As can be seen from Fig. 3.5, participants crossed the intersection at a position ahead of the center of the traffic gap under all conditions. Gap crossing position was systematically a little (0.06 s on average) closer the center of the traffic gap when participants were confronted with the double-sized vehicles as compared to the normal-sized vehicles. Post-hoc analysis of the main effect of offset demonstrated that, compared to the no-offset condition, an early offset gave rise to crossing the intersection further ahead of the center of the traffic gap ($p < 0.01$) while a late offset gave rise to crossing the intersection closer to the center of the traffic gap ($p < 0.01$). The persistence, up to the point of intersection crossing, of an effect of offset in the participant's initial distance to the intersection was also reported by [Louveton, Bootsma, et al. \(2012\)](#) and [Louveton, Montagne, et al. \(2012\)](#). As in these earlier studies, however, this finding did not imply that participants continued to drive at the initial speed, without implementing functional speed regulations during approach to the intersection: At the time of crossing the initial (+1 s) difference between early and no offset conditions had been reduced to +0.19 s and the initial (−1 s) difference between late and no offset conditions had been reduced to −0.18 s, on average. These changes correspond to average final crossing positions of +0.65, +0.46, and +0.28 s for the early (+1 s), no (0 s), and late (−1 s) offset conditions, respectively.

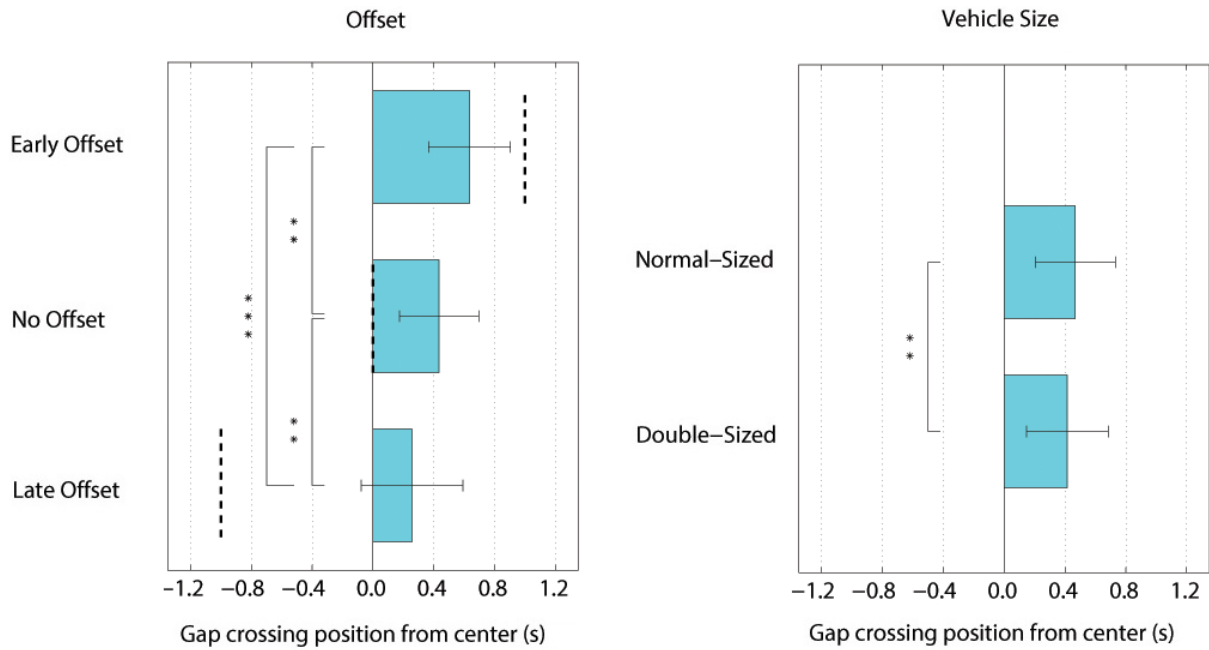


Figure 3. 5 : Average gap crossing position as a function of initial offset (left panel) and traffic vehicle size (right panel). Vertical dotted black line segments indicate the position where participants would have crossed the intersection if they had maintained the initial speed over the full duration of the trial. The gap's trail and lead vehicles were respectively located at -1.35 s and $+1.35$ s from the gap center. $***p < 0.001$ and $**p < 0.01$ significant differences. Error bars indicate average within-participant standard deviations.

Speed profiles

As already indicated by the results on gap crossing position, participants did not simply maintain their initial speed notwithstanding the fact that this would have allowed them to cross the intersection without colliding with the traffic vehicles. The speed profiles presented in Fig. 3.6a indicated that in the early offset conditions participants appeared to have decelerated early on during the approach, as speed was already well below its initial value at 3.5 s before reaching the intersection. They continued to decelerate up to 2.5 s before reaching the intersection before reaccelerating during the final phase of approach. In the no offset conditions, participants appeared to have almost fully maintained their initial speed during the initial phase of approach: at 3.5 s before reaching the intersection participant speed was only slightly below 16 m/s. From there on they began to accelerate

and continued to do so up to the moment of intersection crossing. In the late offset conditions participants appeared to have accelerated early on during the approach, as speed was already well above its initial value at 3.5 s before reaching the intersection. They continued to accelerate up to the moment of intersection crossing. This general pattern of speed regulation as a function of offset condition was observed whether the traffic vehicles were cars or motorcycles and whether they were normal-sized or large-sized. As demonstrated by the statistical analyses, the size and type characteristics of the vehicles in the traffic train did however bring about subtle but systematic variations in this general pattern.

Since we already observed differences in participant speed at the earliest Time Step analyzed (i.e., at 3.5 s before reaching the intersection), we first assessed the participants' initial reaction to the different experimental conditions by analyzing the speed after having been exposed to the intersection-crossing scenario for 1 s (i.e., around 4 s before arrival at the intersection). An ANOVA on participant speed at 1 s after the beginning of the approach to the intersection revealed significant main effects of factors offset ($F(1.98, 25.77) = 21.90$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.63$) and vehicle type ($F(1, 13) = 10.92$, $p < 0.01$, $\eta^2_p = 0.45$). While none of the interactions approached significance (all $p > 0.1$ and $\eta^2_p < 0.13$), the factor vehicle size tended towards significance ($F(1, 13) = 3.44$, $p = 0.09$, $\eta^2_p = 0.21$). Nevertheless, because the speed difference between the normal-sized and double-sized vehicles was < 0.1 m/s, the possible early effect of vehicle size could be considered negligible. On average speed after 1 s of exposure was lower under the early offset conditions than under the no offset conditions (15.5 m/s vs. 15.8 m/s, $p < 0.01$) and higher under the late offset conditions than under the no offset conditions (16.0 m/s vs. 15.8 m/s, $p < 0.05$).

Perception versus Perception-Action

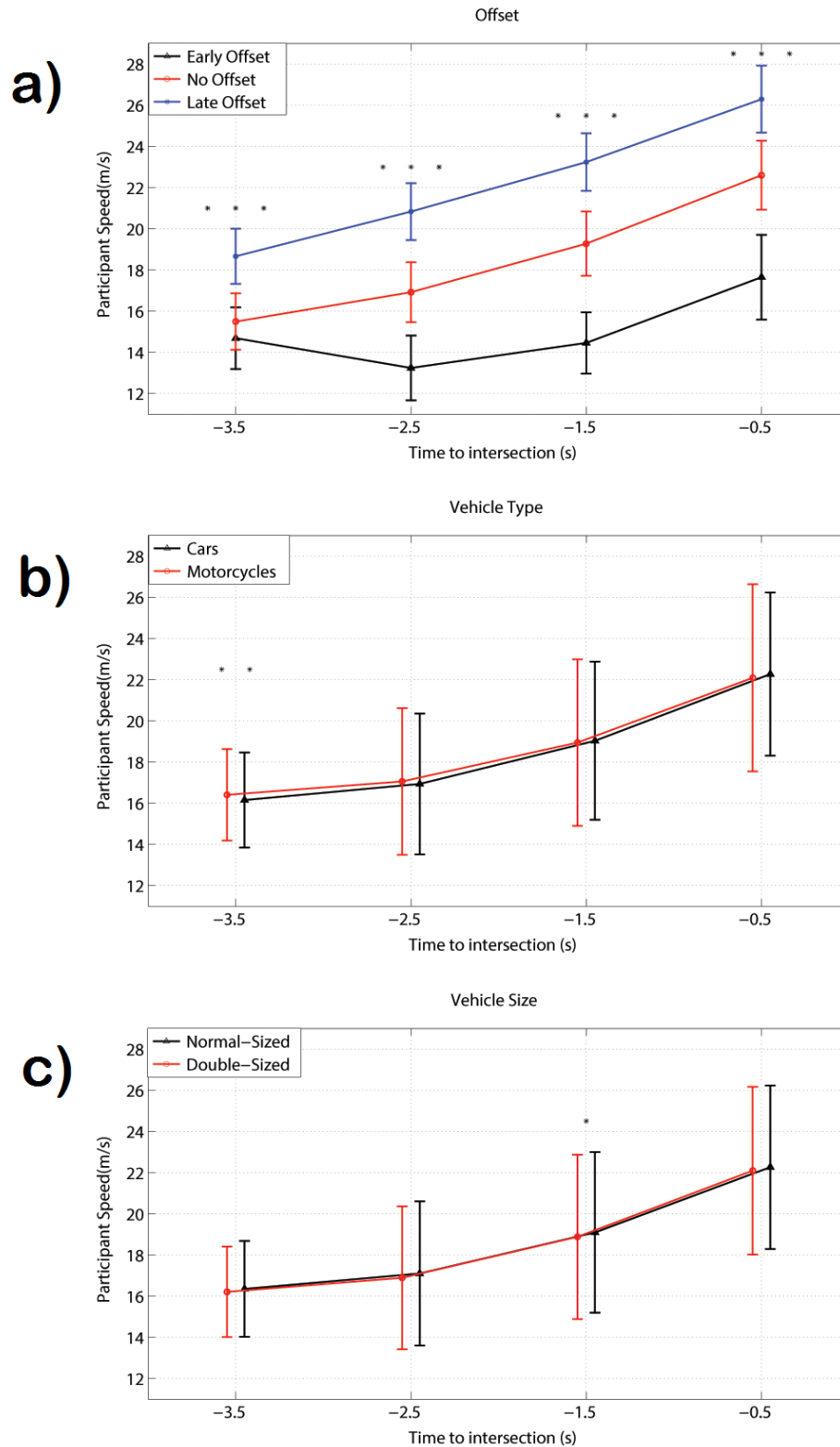


Figure 3. 6 : Average participant speed as a function time before crossing the intersection for each offset (a), vehicle type (b) and vehicle size (c). *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$ and * $p < 0.05$ significant differences. Error bars indicate average within-participant standard deviations.

Thus, the different offset conditions evoked quite rapid, offset-specific reactions. Of particular interest for the present purposes was that different vehicle types also evoked such rapid reactions: On average participant speed after 1 s of approach to the intersection was lower when the traffic train contained cars as compared to motorcycles (15.7 m/s vs. 15.9 m/s).

As was to be expected from the observation of an influence of offset conditions on the final gap crossing position, Offset effects on participant speed persisted throughout the approach to the intersection (at each Time Step: $F > 300$, $p < 0.001$, $\eta^2_p > 0.98$). More interesting for the present purposes was the finding that the effect of vehicle type (already observed at 1 s into the scenario) was still present at 3.5 s before reaching the intersection before washing out over the course of the approach to the intersection (see Table 1 and Fig. 3.6b). At 3.5 s before reaching the intersection the effect of vehicle size, characterized by $\eta^2_p = 0.17$, was not significant ($p > 0.1$), nor were any of the interactions (all $p > 0.1$ and $\eta^2_p < 0.10$). While vehicle size did not affect participant speed in the early stages of the approach (i.e., at 1 s after the start and at 3.5 s before reaching the intersection), traffic trains containing double-sized vehicles were found to give rise to slightly but systematically lower participant speeds at 2.5 s ($p = 0.084$, $\eta^2_p = 0.21$) and 1.5 s ($p < 0.05$, $\eta^2_p = 0.13$) as compared to traffic trains containing normal-sized vehicles (see Table 1 and Fig. 3.6c). This effect of vehicle size on participant speed was no longer significant shortly before the intersection was crossed.

Perception versus Perception-Action

Table 3. 1: Effects of Vehicle Type and Vehicle Size on participant speed at different times before arrival at the intersection.

TTI (s)	Vehicle Type				Vehicle Size			
	Diff.	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2_p	Diff.	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2_p
	Mot-Car (m/s)	(1, 13)			Nor-Dble (m/s)	(1, 13)		
3.5	0.25	9.76	< .01	.43	0.14	2.61	> .1	.17
2.5	0.12	1.50	> .1	.10	0.21	3.50	< .1	.21
1.5	-0.09	0.65	> .1	.02	0.21	6.72	< .05	.13
0.5	-0.18	2.18	> .1	.14	0.17	2.31	> .1	.15

TTI: Time to intersection. Diff. Mot-Car: Average difference in participant speed between traffic trains containing motorcycles and traffic trains containing cars. Diff. Nor-Dble: Average difference in participant speed between traffic trains containing normal-sized vehicles and traffic trains containing double-sized vehicles.

Current deviation

Continuously extrapolating the current state of affairs to the future moment of passing the intersection, the variations over time of the current deviation (CD) from the center of the traffic gap allow a functional interpretation of the speed regulations described in the previous section.

As can be seen from Fig. 3.7a, at 3.5 s before reaching the intersection the initial early (+1 s) and late (−1 s) offsets had already been reduced, as a result of the early change in speed discussed in the previous section. For the no-offset conditions, CD was only slightly below 0 s, as a result of participants largely maintaining their initial speed. Speed regulations continued to reduce CD under all conditions up to 2.5 s before reaching the intersection. From there on the acceleration observed under all conditions (see Fig. 3.6a) gave rise to a systematic increase in CD, leading participants to cross the intersection at positions ahead of the center of the traffic gap (see Fig. 3.5).

As was to be expected from the observation of an influence of offset conditions on the final gap crossing position, offset effects persisted throughout the approach to the intersection (at each Time Step: $F > 30$, $p < 0.001$, $\eta^2_p > 0.70$). More interestingly for the present purposes was the observation of an early effect of vehicle type on current deviation. Participants' current deviation at 3.5 s before reaching the intersection was slightly (0.08 s) but systematically larger when the traffic train contained motorcycles rather than cars. This initial effect of vehicle type gradually disappeared over the approach to the intersection (see Table 2 and Fig. 3.7b). The washing out of the vehicle type effect over the course of the approach to the intersection (η^2_p decreasing from 0.53, to 0.17, see Table 2) is consistent with the absence of such an effect at the moment the participants crossed the intersection. The effect of vehicle size, on the other hand, did not reach significance in the earliest stage of approach ($p = 0.065$, $\eta^2_p = 0.24$), but became significant thereafter (η^2_p increasing from 0.24 to 0.55, see Table 2), consistent with the finding that participants crossed the intersection closer to the lead vehicle for normal-sized cars than for double-sized cars (see Fig. 3.7c).

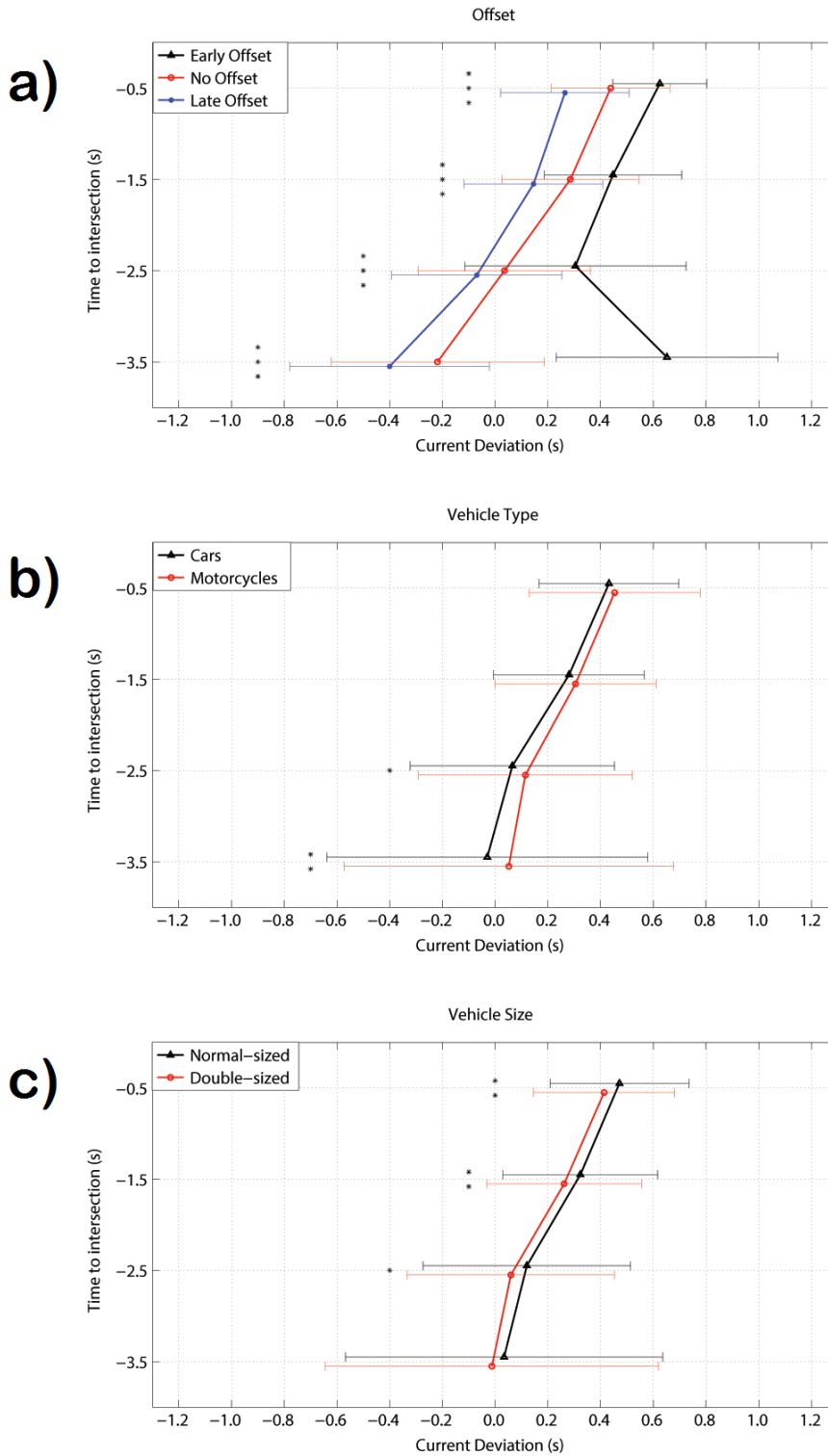


Figure 3. 7 : Average current deviation as a function time before crossing the intersection for each offset (a), vehicle type (b) and vehicle size (c). The gap's trail and lead vehicles were respectively located at -1.35 s and $+1.35$ s from the gap center. $***p < 0.001$, $**p < 0.01$ and $*p < 0.05$ significant differences. Error bars indicate average within participant standard deviations.

Perception versus Perception-Action

Table 3. 2 : Effects of Vehicle Type and Vehicle Size on current deviation at different times before arrival at the intersection.

TTI (s)	Vehicle Type				Vehicle Size			
	Diff.	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2_p	Diff.	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2_p
	Mot-Car (s)	(1, 13)			Nor-Dble (s)	(1, 13)		
3.5	0.08	14.56	< .01	.53	0.05	4.06	< .1	.24
2.5	0.05	6.58	< .05	.34	0.06	5.18	< .05	.28
1.5	0.02	3.52	< .1	.21	0.06	11.04	< .01	.46
0.5	0.02	2.63	> .1	.17	0.06	15.73	< .01	.55
0	0.02	2.37	> .1	.15	0.06	14.43	< .01	.53

TTI: Time to intersection. Diff. Mot-Car: Average difference in temporal current deviation between traffic trains containing motorcycles and traffic trains containing cars. Diff. Nor-Dble: Average difference in temporal current deviation between traffic trains containing normal-sized vehicles and traffic trains containing double-sized vehicles. TTI = 0 s corresponds to the moment the participants crossed the intersection.

Discussion

The aim of the second experiment was to analyze the influence of both the size and the type of vehicles in a traffic train on drivers' approach and intersection crossing behavior. We will first analyze the time course of participant speed changes when confronted with different offsets, before examining more precisely to what extent the two variables of interest (size and type) modified the way they accomplished the intersection crossing task.

Patterns of speed change at each offset

Offset manipulations were introduced to encourage participants to actively control their speed during approach to the intersection so as to ensure a safe crossing. The results

obtained in the ± 1 s offset conditions revealed functional speed changes spread over the course of approach to the intersection allowing the participants to cross the inter-vehicular gap near its center, with a small bias towards early arrival in all conditions. Two additional adjustment characteristics are worth noting. First of all, the participants were shown to detect the need for producing speed changes early on during the approach, with offset-related functional speed changes already being present 1 s after the appearance of the train of vehicles. This strategy allowed the participants to distribute speed adjustments over the entire approach, rather than producing large, and probably not optimal, last second adjustments. The second characteristic is related to the fact that participants did not fully compensate for the initial offsets; the final crossing positions were still different among the three offsets (see [Louveton, Bootsma, et al. \(2012\)](#), [Louveton, Montagne, et al. \(2012\)](#), and [Chihak et al., 2010, 2014](#), for similar results). Taken together, these results speak to the operation of an information-driven type of control allowing functional adjustments to take place all along the approach.

Effects of size and type

Both the size and the type of the approaching vehicles only gave rise to subtle but nevertheless systematic adjustments. Double-sized vehicles gave rise to lower participant speeds (≈ 0.2 m/s) during the intermediate part of the approach resulting in slightly smaller current deviations in comparison with normal-sized vehicles. As a consequence, the gap was crossed a little further from the lead vehicle (≈ 0.06 s) when approaching vehicles were double-sized as compared to normal-sized. The type of approaching vehicle affected intersection crossing behavior in a different way, according to a different temporality. The type of vehicle encountered affected participant speed early on (i.e., soon after the vehicles

appeared) while this influence subsequently washed out over the course of the approach. More precisely, during the first seconds following the appearance of the vehicles, participant speed was lower when the traffic train contained cars as compared to motorbikes ($\approx 0.2\text{m/s}$). These very early adjustments were not only limited in magnitude but also not functional, in the sense that they did not influence the final intersection crossing locations.

Overall, the results of the second experiment indicated a systematic thought limited influence of both the size and the type of the approaching vehicles on participants' intersection crossing behavior. The type effect coincided with the appearance of the train of vehicles and vanished during the second part of the approach. Conversely, the size effect appeared later and was maintained until the end of the approach, giving rise to distinct intersection crossing positions.

General discussion

In this contribution we addressed the widely-shared conviction that negotiating traffic is based on (punctual) predictive assessments of the situation and that insight into the perceptual-motor mechanisms underlying a road-user's safe or risky behavior can be derived from understanding the factors influencing the predictive assessment of supposedly critical variables, such as the estimated time until arrival of a traffic vehicle at a designated location or the estimated size of a gap in a train of traffic (e.g., [Caird & Hancock, 2002](#); [Caird & Hancock, 1994](#); [Dewing et al., 1993](#); [De Lucia, 2013](#)). More specifically, we examined the ensuing hypothesis that the active control of approach to an intersection with incoming traffic is influenced by estimations of the arrival times of traffic vehicles approaching the intersection, because both tasks would rely on a similar perceptual substrate. To this end, we assessed the influences of actual AT as well as the size and the type of approaching

vehicle(s) on AT judgments (using the standard discrete-response motion-extrapolation paradigm, Experiment 1) and active intersection-crossing behavior (using a driving simulator, Experiment 2). Overall, the results obtained in the two experiments do not provide evidence in favor of reliance on a common perceptual substrate in the two tasks. Neither the effects of actual AT nor the effects of the size or type of approaching vehicles observed in the AT judgments of Experiment 1 gave rise to the expected corresponding effects in speed regulation during the active approach to the intersection of Experiment 2.

In line with earlier studies ([Schiff & Detwiler, 1979](#); [McLeod & Ross, 1983](#); [Cavallo & Laurent, 1988](#)), AT judgments revealed systematic underestimations for the longer actual ATs. Use of successive AT estimates in the no-offset conditions of the active intersection-crossing task should therefore have led our participants to increase their speed early on during the approach, when AT was largely underestimated, followed by a decrease in speed as actual AT decreased and estimates became more accurate. The results of the present study do not fit these predictions. While early and Late Offsets gave rise to early functional adjustments (characterized by, respectively, a decrease or increase in speed during the early phase of approach, compensating for the experimentally-induced current deviations), in the no-offset conditions speed was initially maintained approximately constant before increasing during the last seconds of approach to the intersection (Fig. 3.6a). In the present contribution we furthermore tested how the size and type of incoming traffic vehicles influenced both AT judgments and active intersection-crossing behavior. Often confounded in the literature, both vehicle size and vehicle type were found to affect AT judgments albeit it with different effects at different actual ATs.

For longer actual ATs doubled-sized vehicles were judged to arrive earlier than normal-sized vehicles and this size effect diminished as actual AT decreased. The prevalence

of the size effect on AT judgments when vehicles were still far from the intersection (i.e., 2–3 s before crossing, see Experiment 1) was expected to lead drivers to adopt a somewhat higher speed early on during approach to the intersection when the traffic train consisted of double-sized vehicles as compared to normal-sized vehicles. Our results, however, revealed no effect of vehicle size early on during approach. Rather, we observed a slight decrease in speed from 2.5 s before crossing onwards, persisting up to the moment of crossing itself. The observed speed regulations were therefore not compatible with the effects expected on the basis of AT judgments.

The effect of vehicle type revealed a similar finding: vehicle type did not affect the AT judgments of Experiment 1 at the longest actual AT (i.e., 3 s), but only came to the fore at the shorter actual ATs (i.e., 1 and 2 s), with cars being judged as arriving earlier than motorcycles. Thus, whether the train of incoming traffic contained cars or motorcycles was not expected to influence driving speed during the initial phase of approach to the intersection. A traffic train containing cars rather than motorcycles was however expected to lead drivers to slightly increase speed during the final phase. Contrary to these predictions, our results revealed that a traffic train containing cars rather than motorcycles provoked a slight decrease in speed very early during the approach (i.e., 5 s before crossing). This type effect subsequently washed out over the approach.

Overall, the results obtained thus indicate qualitative differences between, on the one hand, the behavior predicted from the AT judgment task results and, on the other hand, the behavior observed in the active intersection-crossing task, suggesting that the two tasks rely on different perceptual substrates. Not only was the temporality of both effects different in the two tasks, but the types of adjustments observed (i.e., either increase or

decrease in speed) in the actual intersection-crossing task were also opposite to the predictions.

Taken together, the results from the two experiments indicate that the AT judgment task and the active intersection-crossing task rely on different perceptual substrates. As a consequence, the conclusions drawn from tasks in which participants are asked to judge AT cannot be directly transferred to predictions on behavior in active perceptual motor tasks. If, as suggested by the results reported here, the general belief that AT estimates are necessarily involved in (safely) negotiating traffic situations is incorrect, one can wonder what type of perceptual information could then be used by active road users and more generally about the type of perceptual-motor mechanism that could be implemented. Identifying the type of perceptual information involved in the active control of approach to an intersection falls outside the scope of the present contribution work. For the time being, we must therefore limit ourselves to speculations only.

The first is related to the type of predictive information participants could use in our perceptual-motor task. Rather than calling upon AT estimates, the actual intersection-crossing task could require predictions about the speed of the approaching vehicle(s), so as to match ego speed accordingly. Recent work by [Clark, Perrone, and Isler \(2013\)](#); [Clark, Perrone, Isler, and Charlton \(2016\)](#) on the perceived speed of moving objects indicates that a large object appears to move more slowly than a small object moving at the same speed. A lower speed estimation for double-sized vehicles (in comparison to normal-sized ones) could explain the decrease in driving speed produced by the participants in the active intersection-crossing task of Experiment 2. In this context the effect of vehicle type remains unclear however, in the sense that it is unlikely that the speed of a more threatening vehicle would

be underestimated in comparison to a less threatening one. Additional experimental work will be necessary to clarify this point.

In seeking to identify the perceptual information involved in the active control of approach to an intersection one should keep in mind that the manipulations of both the size and the type of the incoming-traffic vehicles only marginally affected driving behavior (cf. Figs. 3.6b-3.7b and 3.6c-3.7c). On the other hand, the systematic observation of functional speed changes during the approach phase described in Experiment 2 (cf., Figs 3.6a-3.7a), conforming earlier findings from [Chihak et al. \(2010, 2014\)](#), [Louveton, Bootsma, et al. \(2012\)](#), and [Louveton, Montagne, et al. \(2012\)](#), should not be minimized and could mirror the use of prospective information (i.e., information about the current future; [Bootsma, 2009](#)) in the regulation process. First indications of what such prospective information might entail may be gleaned from two earlier studies. The pattern of speed adjustments during approach to the intersection was found to be affected, on the one hand, by the geometry of the intersection ([Louveton, Bootsma, et al., 2012](#)) and, on the other hand, by the (global) characteristics of the inter-vehicular gap itself, as well as the characteristics of its (local) boundaries ([Louveton, Montagne, et al., 2012](#)). Such effects appear to be compatible with the use of information contained in the change of bearing angle, as we already demonstrated in locomotor interception tasks ([Bastin, Craig, & Montagne, 2006](#); [Bootsma, Leduit, Casanova, & Zaal, 2016](#)), driving the system towards a constant gap-related bearing angle and away from constant bearing angles of the lead and trail vehicles. Clearly the situation is more complex in crossing than in interception tasks, if only for the fact that the gap-related bearing angle can refer to a continuum of positions within the inter-vehicular gap. However this may be, identification of the perceptual information allowing for the occurrence of the gradual and functional regulations described in here and earlier work

clearly requires further work. From the present study we have learned that in the new control architecture that will emerge arrival time estimations should not play more than a marginal role.

***Les marqueurs du couplage
Information-Mouvement***

Information–movement coupling in the control of driver approach to an intersection²

Abstract

In this work we characterized the control mechanisms underlying crossing an intersection with vehicular traffic. Specifically, we identified potential markers of the coupling between information and movement, through a kinematic analysis of the approach. We exposed participants in a driving simulator experiment to several scenarios. We manipulated task constraints by varying the acceleration capabilities of the vehicle and the time available to make speed adjustments. The results highlighted gradual, systematic adjustments, which make it possible to cross the intersection in a zone that is close to the center of the inter-vehicular gap. The functional nature of these adjustments was highlighted by concomitant and opposite variation in the variability of current speed and current deviation. In all cases, an increase in the standard deviation of speed was accompanied by a reduction in the standard deviation of current deviation. Neither time to make adjustments, nor acceleration capabilities modified the observed kinematic patterns, but they did modulate the adjustments that were produced. Overall, these results were consistent with a control mechanism based on the implementation of an information-movement cycle.

² Mathieu, J., Bootsma, R.J., Berthelon, C. et Montagne, G. (2017). Information–movement coupling in the control of driver approach to an intersection. *Ecological Psychology*, 29(4), 317-341.

Introduction

Recent data on driving-related road accidents (e.g., the 2015 assessment carried out by the French *Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière* [National Interministerial Road Safety Observatory]) showed that approach and crossing maneuvers at intersections were particularly prone to accidents; indeed in the year 2015 3,461 people were killed and 70,802 people were injured in France during such maneuvers, the gravity of these accidents due to the violence of the collisions. Identifying the factors that can explain such accidents is a major societal issue in order to develop and implement effective prevention policies. Our study was part of this process specifically because it aimed at gaining a better understanding of the perceptual-motor mechanisms that underlie an intersection-crossing task.

This contribution built on earlier work from our group on the active control of speed during approach to an intersection with incoming traffic ([Louveton, Bootsma, Guerrin, Berthelon, & Montagne, 2012](#); [Louveton, Montagne, Berthelon, & Bootsma, 2012](#); [Mathieu, Bootsma, Berthelon, & Montagne, 2017](#)). Driving a simulator, the participants' task in these studies was to safely cross the intersection by passing through a gap in the train of incoming traffic. In order to evoke adjustments in driving speed, on each trial the initial participant intersection distance was varied so that without any speed adjustments they would arrive at the intersection ahead (Early Offset), behind (Late Offset), or at the same time (No Offset) as the center of the traffic gap. The results consistently demonstrated that, when required, approach to the intersection gave rise to gradual adjustments in driving speed with participants targeting a precise, limited crossing zone located slightly ahead of the center of the traffic gap. Overall, our previous results revealed that different task variables (traffic gap

size and intersection geometry: [Louveton, Bootsma, et al., 2012](#); leading and trailing traffic gap vehicles' speed: [Louveton, Montagne, et al., 2012](#); traffic gap vehicles' size and type: [Mathieu et al., 2017](#)) subtly but systematically affected the evolution of driving speed during approach to the intersection. Yet, in all cases, crossing the intersection remained circumscribed to an area slightly ahead of the center of the traffic gap. Adjustments in approach speed thus appeared to indicate an attempt to optimize performance on the task by targeting a "low-risk" crossing zone, located around the center of the gap, and prioritizing the earlier part (see [Chihak, Grechkin, Kearnev, Cremer, & Plumert, 2014](#); [Chihak, Plumert, Ziemer, Babu, Grechkin, Cremer, & Kearney, 2010](#), for equivalent results from an intersection-crossing task on a bicycle).

A complementary analysis, based on a prospective variable denoted current deviation, allowed us to more directly evaluate the functional character of observed speed adjustments. At any moment during the approach to the intersection, current deviation corresponds to the (spatial or temporal) distance from the center of the traffic gap at which the participant would pass the intersection if the current driving speed were to remain constant from thereon ([Louveton, Bootsma, et al., 2012](#)). This future related variable thus allowed determining whether speed adjustments served to reduce current deviation, that is, to continuously target the center of the gap in the train of incoming traffic. The results obtained indeed confirmed the functional character of speed adjustments: they resulted in a gradual reduction in current deviation during the approach phase before ultimately targeting a zone slightly offset in the direction of the gap's leading vehicle during the last instances before intersection crossing.

The repeated observation of this same pattern of results under varying task conditions ([Louveton, Bootsma, et al., 2012](#); [Louveton, Montagne, et al., 2012](#); [Mathieu et](#)

al., 2017) points to the operation of a control mechanism that is based on a continuous information–movement coupling (Bootsma, 1998) aimed at gradually modulating speed in such a way that the adjustments necessary to carry out the task were distributed over the whole approach phase. Comparing active control of approach with discrete judgments of time remaining until arrival, in Mathieu et al. (2017) we made a further step in the characterization of this control mechanism by showing that, contrary to conventional thinking, control of speed during approach to the intersection was not based on successive estimates of the time remaining until arrival (necessarily inaccurate for long durations; see McLeod & Ross, 1983; Schiff & Detwiler, 1979) but on a precise perception of the state of the agent–environment system (AES), as captured by the current deviation.

These results were thus consistent with the precepts of the ecological approach (Bootsma, 1998; Gibson, 1979/1986; Warren, 1988, 2006) according to which the control of a goal-directed action is based on a coupling between an information variable that specifies the state of the AES and a movement variable, influencing this AES state. Control of the action can then be conceived as a circular process in which behavior-related adjustments derive from the reciprocal relations between information and movement. By means of laws of control (Warren, 1988), mathematical formalizations of such reciprocal relationships provide testable designs of the information–movement relationship underlying the control of an action (see, e.g., Chardenon, Montagne, Laurent, & Bootsma, 2004; Montagne, Laurent, Durey, & Bootsma, 1999; Warren, Kay, Zosh, Duchon, & Sahuc, 2001; Warren, Young, & Lee, 1986).

However, the formalization of a control law is not always easy, a fortiori when task constraints are complex, as is the case for intersection-crossing tasks in which the intervehicular traffic gap offers the agent considerable margins for maneuver. In this case, it

becomes difficult to determine whether the limits of the inter-vehicular gap and/or the gap taken as a whole are taken into account by the agent ([Louveton, Montagne, et al., 2012](#)). Consequently, although the formalization of a control law for this kind of task remains a long-term objective, in the present study we concentrated on extending the analysis of the regulatory behavior of drivers in our intersection-crossing task. This analysis allowed us to more precisely characterize regulation behavior and thereby provide recommendations for studies that seek to formalize a control law.

Apart from our own work and that of Chihak and Plumert, few studies have attempted to characterize the perceptual–motor control mechanisms that underlie active intersection-crossing tasks (cf. [Mathieu et al., 2017](#)). However, many sports skills, such as the standing backward somersault in gymnastics ([Bardy & Laurent, 1998](#)), the hitting or catching of a ball ([Bootsma & Van Wieringen, 1990](#)), or the long jump run-up ([Lee, Lishman, & Thomson, 1982](#)), have been analyzed in terms of the reciprocal relations between information and movement, and various markers of the information–movement coupling have been identified.

The first marker corresponds to a gradual improvement in the precision of the action over the course of execution. This progressive gain in precision has been observed in the context of the long jump run-up, described in terms of a gradual decrease in the amount of adjustment required to precisely strike the takeoff board ([Montagne, Cornus, Glize, Quaine, & Laurent, 2000](#)). It has also been highlighted in ball-catching tasks, based on the convergence of the current speed of hand movement toward the speed required to successfully complete the task ([Montagne et al., 1999](#); [Peper, Bootsma, Mestre, & Bakker, 1994](#)). Similarly, the aforementioned progressive reduction in current deviation over the approach to an intersection observed in our earlier work ([Louveton, Bootsma, et al., 2012](#);

[Louveton, Montagne, et al., 2012](#); [Mathieu et al., 2017](#)) could be an indication of the operation of information–movement coupling.

The second, somewhat subtler, marker of information–movement coupling resides in the time course of variability over repeated trials (i.e., the evolution during task execution of within-participant between-trial variability) in both intermediate adjustment and task-level control variables. Supposing that task execution does not change qualitatively over a limited number of repeated trials, between-trial variability patterns allow inferences to be made about the control mechanisms operating at the scale of a trial, as detailed later.

In the long jump run-up, one task-level variable that determines performance on the task corresponds to the distance between the toes of the push-off leg's foot from the front edge of the takeoff board. At the last point of contact with the ground before push-off, this distance determines the final error with respect to the takeoff board and thereby, at least in part, subsequent long-jump performance. This toe-to-board distance can, of course, also be calculated for each previous step of the run-up. The data in the literature indicate that between-trial variability in the toe-to-board distance decreased over the last steps prior to takeoff and was minimal for the very last step that precedes takeoff (e.g., [Lee et al., 1982](#); [Scott, Li, & Davids, 2000](#)), reflecting the visual adjustment of the length (or duration) of the step. Between-trial variability in step length (i.e., the intermediate adjustment variable) increased concomitantly with the decrease in the between-trial variability of the task-level control variable toe-to-board distance. In terms of control, these results indicated that task-level errors accumulated during the first part of the run-up were compensated for in the final steps, via the adjustment of step length, in order to hit the takeoff board as accurately as possible.

Similar results were obtained by [Bardy and Laurent \(1998\)](#) in a study of the standing backward somersault performed by expert gymnasts. Here, the (task-level) control variable determining task success corresponds to the orientation of the body in space, and the intermediate adjustment variables correspond to the thigh–leg and trunk–thigh angles that modulate the speed of rotation of the body in space and consequently its orientation. The results obtained once again showed opposite variations in the patterns of between-trial variability of the adjustment (intermediate) and control (task-level) variables during the execution of the somersault. The approach to the landing was characterized by increased between-trial variability in the trunk–thigh and thigh–leg angles, whereas between-trial variability in the orientation of the body in space decreased and became minimal at the time of landing. The speed of body rotation was therefore controlled via the modulation of the opening or closing of the aforementioned angles in order to orient the body in space into a position that was optimal for landing stabilization.

In our previous studies (i.e., [Louveton, Bootsma, et al., 2012](#); [Louveton, Montagne, et al., 2012](#); [Mathieu et al., 2017](#)), the regulation behavior of participants was analyzed through the inspection of average kinematic patterns; our analyses did not focus on the time course of variability over repeated trials in both intermediate and task-level variables. If mechanisms, equivalent to those described earlier, were used in the intersection-crossing task, between trial variability in (intermediate adjustment variable) speed may be expected to increase, whereas between-trial variability in (task-level control variable) current deviation may be expected to concomitantly decrease over the approach to the intersection.

[Bootsma, Houbiers, Whiting, and Van Wieringen \(1991\)](#) used the metaphor of a funnel-like control to illustrate the change in “tolerance” for between-trial variability in movement 160 patterns during execution (Figure 4.1). According to the data presented

earlier, this tolerance is high under mild time constraints, reduces with time, and becomes minimal at the moment the highest level of precision is required, for example, when a table tennis ball is struck ([Bootsma & Van Wieringen, 1991](#)); when a long jumper takes off ([Lee et al., 1982](#)); when a somersaulter lands ([Bardy & Laurent, 1998](#)); or, here, when an inter-vehicular gap is crossed.

Various factors were expected to modulate the between-trial variability profiles of driving speed and current deviation in our intersection-crossing task. The first factor studied was the time available to prepare crossing, defined by the initial time to arrival (TTA) of the center of the approaching intervehicular gap at the intersection. As for tasks of equal difficulty tolerance was hypothesized to be inherently dependent on the time available for adjustment; an increase in TTA was predicted to be accompanied by an increase in initial tolerance. At the beginning of the approach between-trial variability in current deviation was therefore expected to be higher for a longer TTA than for a shorter TTA (Figure 4.1). A second potential mediating factor examined in the current study was the acceleration capability (AC) of the vehicle driven. AC determined the magnitude of the adjustments that could be executed; a vehicle with high acceleration capability allowed the drivers to swiftly modulate their speed.

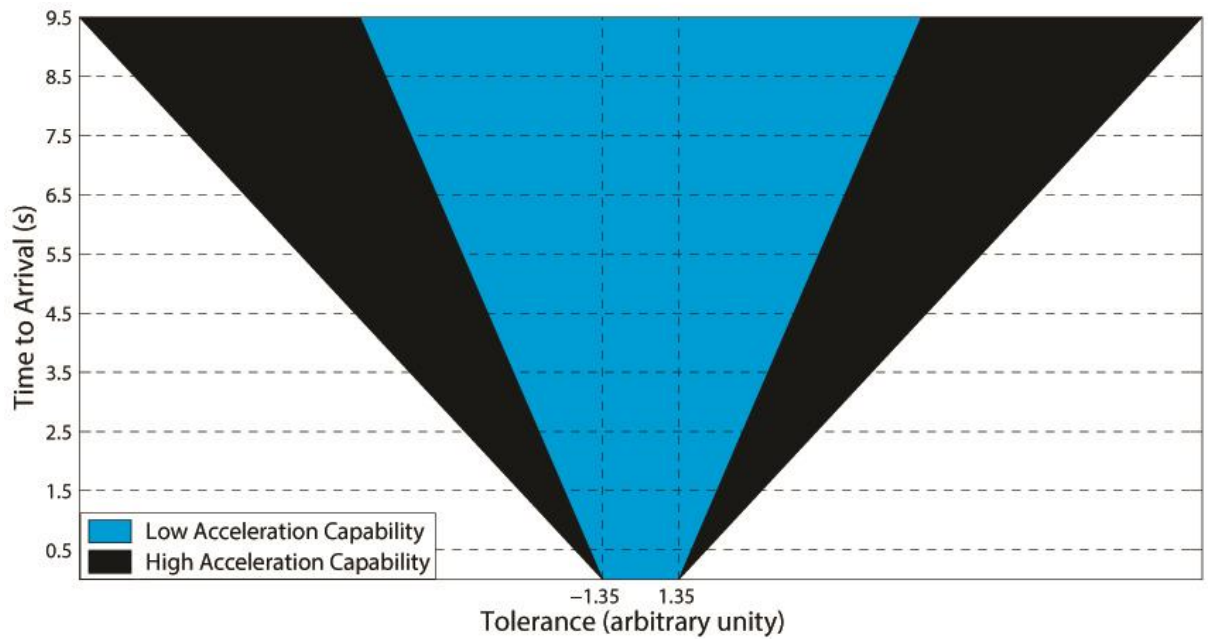


Figure 4. 1 : Schematic representation of the change in temporal tolerance as a function of the time before the arrival of the line of vehicles and the vehicle's response capacities.

Therefore, for a given TTA, a vehicle with high AC was hypothesized to result in higher initial tolerance, leading us to predict higher between-trial variability in current deviation (Figure 4.1). As the speed and the size of the traffic gap were identical over all conditions, between-trial variability in current deviation at the time of crossing was expected to be independent of TTA and AC.

In summary, building on our earlier work on intersection crossing, in this study we more directly tested the hypothesis that control of approach to the intersection was based on a continuous information–movement coupling. To this end, analyses not only focused on average participant behavior but also, for the first time, on between-trial variability in (intermediate adjustment variable) speed and (task-level control variable) current deviation. Markers of information–movement coupling were examined under different conditions of initial tolerance for between-trial variability, operationalized by different initial time-to-

arrival durations of the traffic gap and different acceleration capabilities of the simulated vehicle driven.

Method

Participants

Twelve participants, 6 women and 6 men (26.7 ± 3.8 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 3 years, with an average duration of 7.5 ± 2.3 years. Participants provided written consent prior to the study, which was conducted according to IFSTTAR regulations and the Helsinki Declaration.

Apparatus

Participants drove a fixed-base SIDROH driving simulator based on a Renault Megane II (4.21 m long, 1.78 m wide, and 1.44 m high) equipped with a steering wheel and brake and accelerator pedals. The car was programmed to function with an automatic gearbox so that participants did not have to change gears manually.

Audiovisual environment

The audiovisual environment was generated using the ARCHISIM ([Espie & Auberlet, 2007](#)) software package. Using three Epson 485 W 60 Hz projectors, the visual scene was presented on three adjacent screens (1.80 m high by 1.35 m wide). The left and right screens were oriented inward to maintain a total horizontal visual angle of 150° for a vertical visual

angle of 40° (see Figure 4.2a). The virtual environment was also presented in the side and interior rearview mirrors. The participant's viewpoint was located 1.20 m from the ground and 2.20 m from the front projection screen. A quadraphonic audio system broadcast sounds related to the car (e.g., engine, starter motor) and other vehicles in the environment.

The simulated environment consisted of a straight textured road, with two lanes for opposing traffic separated by intermittent white lines, running through a flat rural environment (see Figure 4.2b). The road on which the participant drove (in the right lane) was orthogonally intersected by a similar second road over which a train of vehicles could approach the intersection from the left. Data were collected at a sampling rate of 60 Hz.

Experimental design

Each participant took part in two experimental sessions over which the vehicle's acceleration capability was manipulated. The two sessions took place on the same half day; there was a 15-min rest period between the two sessions and the order of presentation of high and low AC was counterbalanced over participants. Each session consisted of a calibration phase and an experimental phase.

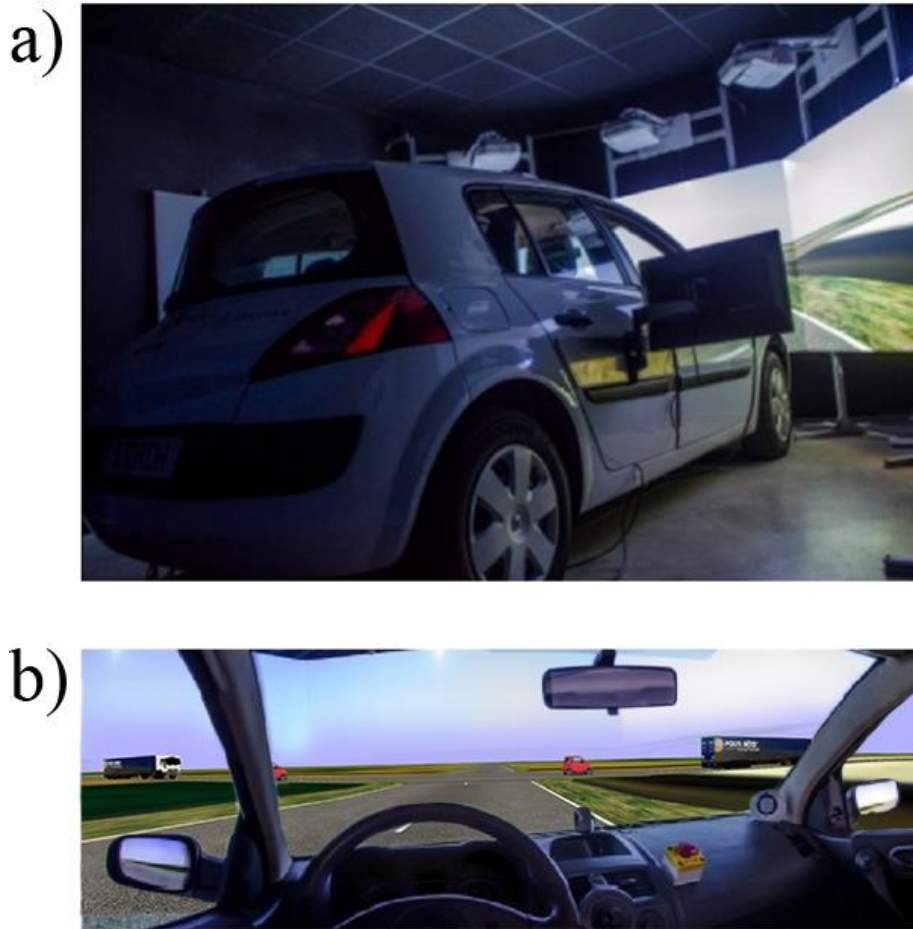


Figure 4. 2 : *An exterior view of the driving simulator with the three projectors and screens (a); the participant's view from inside the simulator (b). The scene is presented on the three screens and in the side and rearview mirrors. Here, the participant could see two trucks separated by two red cars with a 27-m gap between them (b).*

Calibration phase

The calibration phase preceding an experimental session was designed to familiarize participants with the vehicle's action capabilities, notably its acceleration capability, but also the perceptual consequences of the adjustments produced. It consisted of several tests.

Task

Participants were asked to remain at a constant distance of 30 ± 9 m behind a car moving in front of them along a straight road. The speed of the lead car varied. Participants were able to adjust their own speed using the accelerator and brake pedals. The reference distance corresponds to the recommended safe distance between vehicles traveling at a speed of 13.9 m/s (50 km/hr). During the first part of the test, participants received concurrent feedback informing them of their compliance with the instruction (i.e., current inter-vehicular distance = 30 ± 9 m).

Concurrent feedback was provided by means of a vertical gauge positioned to the left of the central projection screen (Figure 4.3a). The required distance was represented by a rectangular zone at the center of this gauge (Figure 4.3b). A real-time cursor, in the form of a sliding horizontal bar, indicated the size of the gap between the lead and participant's cars. When this cursor was within the horizontal rectangle at the center of the gauge (i.e., when the current distance corresponded to the prescribed distance) the gauge was green (Figure 4.3b). When the cursor was in the upper or lower part of the gauge (i.e., when the current distance was above or below the target distance) it turned red. No numerical information was provided.

In the second part of the test, the gauge disappeared, and the task consisted of maintaining the reference distance without the help of feedback.

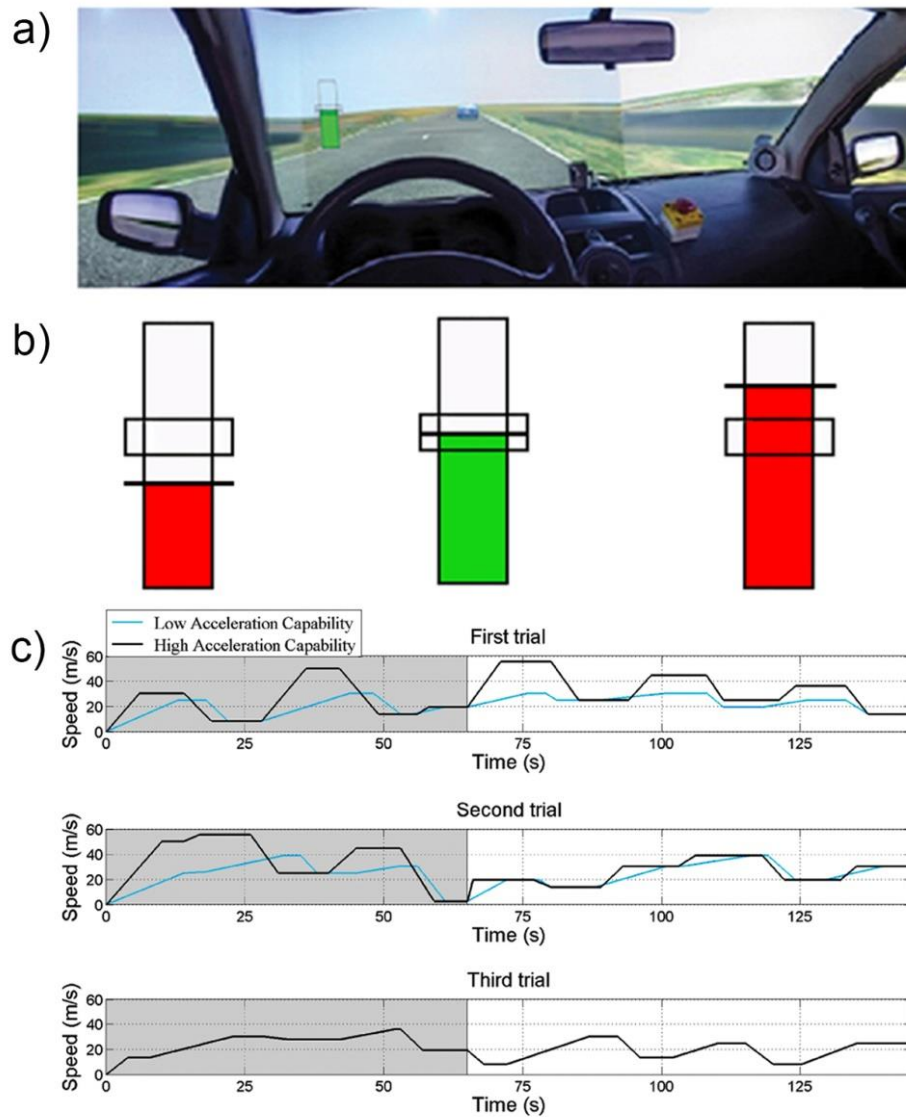


Figure 4.3 : Description of the calibration phase during which participants had to maintain a constant inter-vehicular distance despite changes in the speed of the lead vehicle (a). At the beginning of each test, participants were provided with concurrent feedback in the form of a gauge positioned on the left of the screen (b) showing the difference between the prescribed distance and the current distance. Each calibration block comprised three trials in which the speed of the lead vehicle varied more or less abruptly as a function of whether participants were driving a vehicle with a high acceleration capacity (black line) or low acceleration capacity (blue line) (c). During each trial, participants were initially provided with concurrent feedback (the shaded area), which disappeared in the second half of the trial.

Procedure

A calibration trial lasted 145 s (i.e., 2 min 25 s). At the onset of a trial, participants were stationary, 30 m behind the car in front of them. The trial began when the lead car started to move. This vehicle was programmed to alternate between sections of motion at constant speeds (11 sets) and at variable speeds (11 sets; Figure 4.3c). After 65 s (i.e., during the sixth change in speed of the lead vehicle) concurrent feedback disappeared and the driver had to maintain the reference distance for the next 80 s despite changes in the speed of the lead vehicle. Each calibration test consisted of one or more block(s) composed of three trials each (see Figure 4.3c). The magnitude of speed changes imposed by the lead vehicle was indexed to the acceleration capability of the following vehicle (at least during the first two trials in each block). The total driving time of participants, per block, was therefore 7 min 15 s (435 s).

Calibration phase end criterion

Participants had to maintain the prescribed safe distance, initially with feedback and then without. At the end of each trial the percentage of time that the current distance had remained within the prescribed distance during the period without concurrent feedback was calculated and presented on the central screen. Participants were judged sufficiently “calibrated” when they obtained a score $\geq 80\%$ in at least two of the three trials of a calibration block. If they did not meet this target, they had to repeat the block. After validation of the calibration phase and a short pause, the experimental phase began.

Experimental phase (intersection crossing)

Task

The task was similar to that used in the studies of Louveton et al. (Louveton, Bootsma, et al., 2012; Louveton, Montagne, et al., 2012). Participants were required to safely cross an intersection within a gap delimited by two red cars (2.4 m long, 1.27 m wide, and 1.7 m high) located in a train of vehicles approaching from their left. This traffic train, composed by four vehicles moving at a constant speed of 10 m/s (36 km/hr), consisted of a truck, the two red cars, and another truck (see Figure 4.2b). The gap between the two red cars was 27 m (i.e., 2.7 s). No signage indicating who had priority was present. In the rare cases that a driver collided with another vehicle, a large red triangle appeared on the central screen.

Procedure

At the start of each trial, participants were stationary in the middle of the right-hand lane with no other vehicles present in the environment. The trial began when the participant pulled the horizontal lever protruding from the left side of the steering column (normally used for flashing the lights). The participant had to then reach a target speed of 16.0 ± 0.55 m/s (57.6 ± 2.0 km/hr). A procedure equivalent to that used during the calibration phase was used, with a gauge indicating the target speed and current speed positioned in the center of the frontal screen. An 80-m long rectilinear section of road was available for reaching a current speed that corresponded to the prescribed speed (i.e., to bring the slider to the central zone of the gauge). If this requirement was met over the last 20 m, the gauge

disappeared and the actual intersection-crossing trial began, with the train of vehicles appearing on the left. If the participant did not maintain the required speed over the last 20-m stretch, the procedure was repeated. This procedure for standardizing initial participant speed ensured that the train of approaching vehicles was visible at the start of each trial and that (a) the initial participant-intersection time relation and (b) the initial acceleration capabilities (varying with vehicle speed; see Figure 4.4a) could be controlled.

Independent variables

Three independent variables were manipulated: the time taken for the train of vehicles to arrive at the intersection (TTA); the car's acceleration capability (AC); and, as in our earlier studies, the initial distance of the participant's car with respect to the intersection (Offset).

Time to arrival (TTA)

The initial distance between the center of the traffic gap and the center of the intersection was manipulated to create different TTAs. Given the constant 10 m/s approach speed of the traffic train, initial traffic-train distances from the intersection were set at 65, 75, 85, and 95 m, resulting in TTAs of, respectively, 6.5, 7.5, 8.5, and 9.5 s.

Offset

The initial distance between participants and the intersection was manipulated to create an offset between their expected time of arrival (if they maintained their 16 m/s initial speed) and the time to arrival of the center of the traffic gap at the intersection. For

the 6.5, 7.5, 8.5, and 9.5 s TTAs, the starting distance for participants in the No Offset conditions was therefore set at 104, 120, 136, and 152 m, respectively. In these conditions, simply maintaining their initial speed allowed the participant to intercept the center of the inter-vehicular traffic gap.

In order to induce participants to adjust speed during approach to the intersection, we introduced Early and Late Offsets, as in our earlier studies. In these cases, participants started from an initial distance that was 16 m closer to (*Early*) or farther from (*Late*) the intersection with reference to the No Offset condition. Thus, if they continued to move at a constant speed of 16 m/s, they would arrive at the intersection with an offset of +1 s (*Early*), 0 s (*No Offset*), or -1 s (*Late*) with respect to the center of the inter-vehicular gap, irrespective of TTA. Despite this shift, both Early and Late Offsets theoretically allowed the participant to cross the intersection without changing speed, as the cars that marked the inter-vehicular traffic gap were separated by an interval (bumper-to-bumper) of 2.7 s (27 m).

Acceleration capability (AC)

The car's AC was set to either 6.9 m/s² or 33.1 m/s². Braking capacity remained unchanged (16.9 m/s²). Both ACs allowed the task to be completed for each offset (see Figure 4.4b). Beyond the fact that AC manipulations allowed predictions about the time course of between-trial variability of both intermediate and task level variables to be made, they also allowed us to determine to what extent, following Fajen's (2005) proposal, perceptual processes and action capabilities are intertwined as part of the control of a goal-directed action.

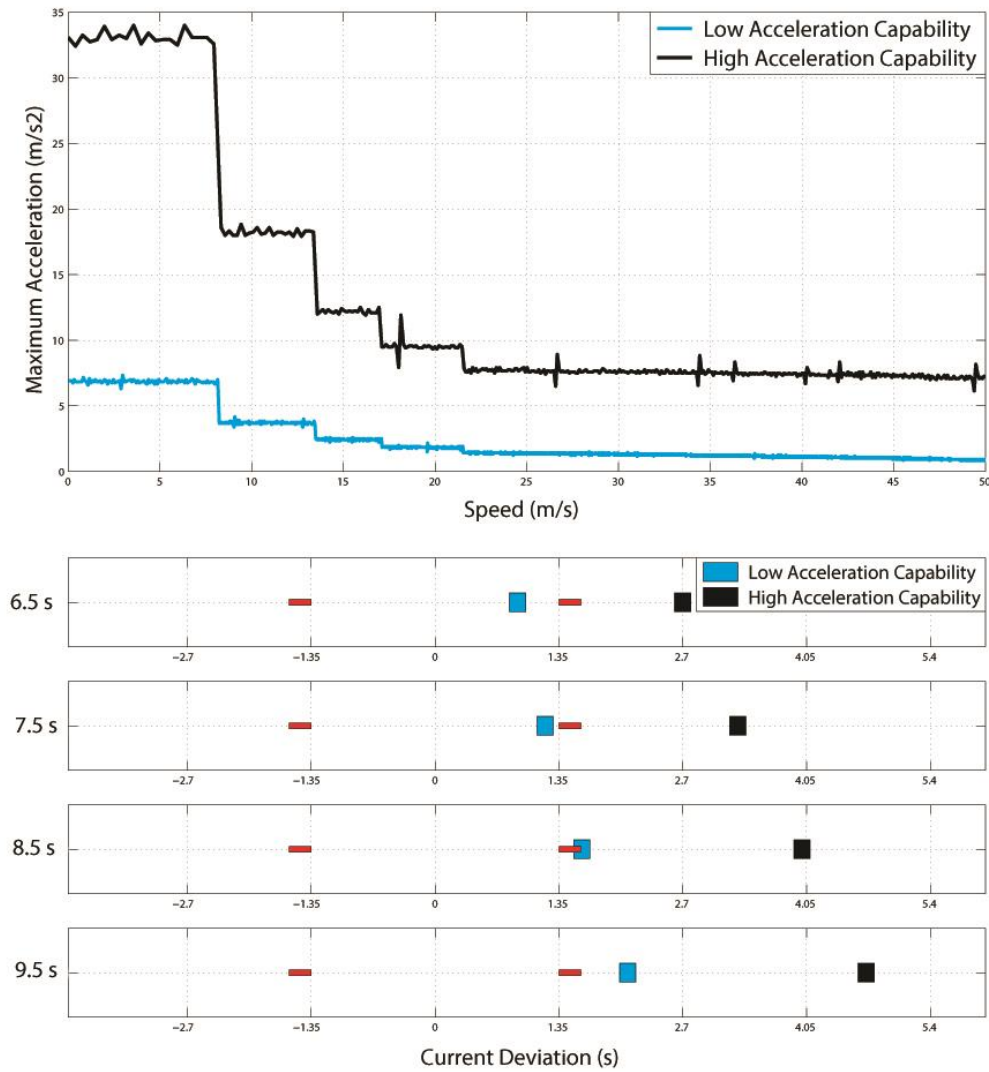


Figure 4. 4 : Evolution over time of the maximum acceleration that can be produced by the two types of vehicles (a) and crossing places with reference to the inter-vehicular interval with maximum acceleration (b). These crossing locations are shown for each type of vehicle, in Late offset conditions and for the four arrival time conditions in the inter-vehicular temporal gap. The red rectangles represent the two cars that delimit the inter-vehicular temporal gap.

Combining the four TTAs and the three Offsets gave rise to an experimental block of $4 * 3 = 12$ trials. The order of presentation of the 12 conditions was randomized within each block. In each of the two AC sessions, participants performed five blocks, for a total of 60 trials per session (i.e., per AC condition) and hence a total of 120 trials for the full experiment.

Dependent variables

In order to allow comparison with our earlier work ([Louveton, Bootsma, et al., 2012](#); [Louveton, Montagne, et al., 2012](#); [Mathieu et al., 2017, Experiment 2](#)), the first part of the analysis examined the average participant behavior under the different experimental conditions for the following variables: *gap crossing position* and *speed* and *current deviation* profiles during the approach phase.

Gap crossing position was defined relative to the time of arrival of the center of the traffic gap at the intersection. A negative crossing time indicated that participants arrived at the intersection after the center of the traffic gap (i.e., closer to the trailing vehicle), whereas a positive value indicated that participants arrived at the intersection before the center of the gap (i.e., closer to the leading vehicle).

In order to examine the nature of the speed adjustments effected during approach to the intersection, we analyzed the time course of the participant's speed and its effect on future passing position within the traffic gap (current deviation). Current deviation thus captured the instantaneous effect of changes in speed on the future gap crossing position (see [Louveton, Bootsma, et al., 2012](#); [Louveton, Montagne, et al., 2012](#); [Mathieu et al., 2017](#)), allowing a functional interpretation of observed speed adjustments. Current deviation was initially +1 s, 0 s, and -1 s in the Early, No, and Late offset conditions, respectively, and subsequently varied as the participant adjusted speed. Current deviation was calculated every time step, from the time of appearance of the train of traffic until the time the participant crossed the inter-vehicular traffic gap.

Analyses of speed and current deviation profiles over time were performed at absolute and relative (i.e., normalized) timescales. In both cases a profile discretization procedure was used.

The analysis at an absolute timescale involved a discretization time step of 1 s for speed and current deviation profiles. To this end, all trials were first synchronized with respect to the moment of participant intersection crossing. Data were then averaged over 1-s periods (60 data points) preceding arrival at the intersection. Because the trial duration differed in each TTA mode, the number of time steps ranged from six (TTA 6.5 s) to nine (TTA 9.5 s).

Even if large differences in the overall duration of the trials prevented us from applying statistical procedures, we deemed it useful to report the main characteristics of the regulation behavior exhibited by the participants at the different real timescales.

The analysis at a relative timescale called upon time normalization and aimed to allow statistical comparisons (by means of ANOVA) of the participant behavior in trials of duration ranging from 6.5 s to 9.5 s. Following synchronization of all trials with respect to the moment of participant intersection crossing, the normalization process consisted of dividing each trial into four equal time intervals and calculating average speed and current deviation for the first (Q1), second (Q2), third (Q3), and fourth (Q4) quarters of the approach phase. Hence, the averaging procedure per trial was based on 97, 112, 127, and 142 observations for each quarter in the 6,5, 7,5, 8,5, and 9,5 TTA conditions, respectively.

The novel part of the analysis focused on within-participant between-trial variability for speed and current deviation. The discretization procedure described in the previous section allowed, for each variable of interest (i.e., speed and current deviation), to compute four mean values for each trial (one per quarter). Between-trial variability corresponded for

each quarter to the standard deviation computed over the five repetitions. Functional speed adjustment in the approach phase were expected to result in concomitant changes in the (between-trial) variability in speed and current deviation (e.g., [Camachon, Buekers, & Montagne, 2004](#); [Chardenon, Montagne, Buekers, & Montagne, 2002](#)). More specifically, they were expected to result in an increase over approach to the intersection in between-trial speed variability, accompanied by a reduction in the between-trial current deviation variability.

Statistical analysis

Statistical analyses were performed using repeated-measures ANOVAs. The participants' (temporal) position in the gap at the time they reached the intersection was analyzed with the factors Offset (Early, No, Late), TTA (6.5 s, 7.5 s, 8.5 s, 9.5 s), and AC (low, high). For speed and current deviation analyses, four-way ANOVAs were conducted with Offset (Early, No, Late), TTA (6.5 s, 7.5 s, 8.5 s, 9.5 s), AC (low, high), and Time Step (Q1, Q2, Q3, and Q4). The same analyses were conducted on within-participant between-trial standard deviations of both current speed and current deviation. When Mauchly's test revealed violations of the sphericity assumption, Greenhouse-Geisser corrections were applied. The statistical significance level was set at $\alpha = .05$. In order to guarantee sufficient power we only considered effects with substantial effect sizes ([Cohen, 1988](#)), operationally defined here as $\eta^2_p > .20$. When appropriate, post hoc analyses were performed using Scheffé tests.

Results

Calibration phase

We first needed to ensure that all participants had integrated the acceleration and deceleration capabilities of their vehicle before beginning the experimental phase. To this end, we examined the number of blocks needed to achieve the required criterion (80% in at least two of the three trials of a block) as well as performance (percentage time spent at required distance) at the end of the calibration phase. The results indicated that calibration took slightly longer when AC was high (2.83 ± 2.2 blocks and 3.25 ± 2.7 blocks for low and high AC, respectively). They also indicated that final performance was comparable over the two ACs ($90.5 \pm 6.7\%$ and $88.8 \pm 6.2\%$ for low and high AC, respectively; see Figure 4.5a and b).

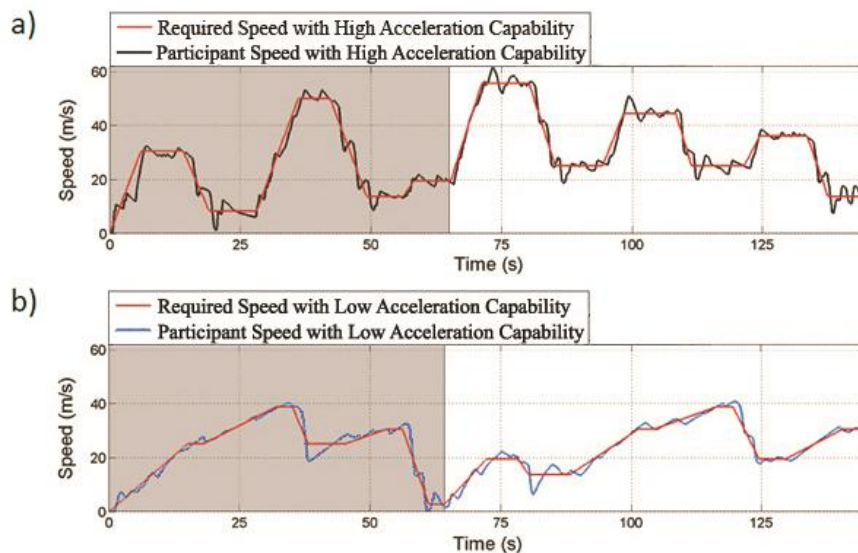


Figure 4. 5 : Illustrations of the regulation behavior produced at the end of the calibration phase by a participant driving a vehicle with high acceleration (a) and low acceleration (b). The gray background represents the period during which participants were provided with concurrent feedback.

These results thus indicated that in each session participants had indeed fully integrated the AC of the vehicle before beginning the experimental phase.

Gap crossing position

An ANOVA on gap crossing position revealed significant main effects for Offset ($F(1.19, 13.03) = 36.09, p < .001, \eta^2_p = .77$), AC ($F(1, 11) = 14.21, p < .01, \eta^2_p = .56$), and TTA ($F(2.36, 25.89) = 3.86, p < .05, \eta^2_p = .26$). None of the interactions reached significance (all $p > .05$, all $\eta^2_p < .17$).

As can be seen from Figure 4.6, participants systematically crossed the intersection slightly ahead of the center of the 2.7-s traffic gap (i.e., closer to the leading vehicle than to the trailing vehicle) under all conditions. However, the three experimental variables resulted in subtle but systematic variations in gap-crossing position. The results showed that gap crossing was particularly early (i.e., closer to the leading vehicle) at high AC (on average +0.41 s and +0.26 s for high and low AC, respectively; Figure 4.6a), at Early Offset (on average +0.47, +0.34 s, and +0.20 s for Early, No, and Late Offset, respectively; Figure 4.6b), and at long TTA (+0.37 s compared with +0.31 s for TTA 9.5 s and 6.5 s, respectively; Figure 6c).

Speed and current deviation profiles (absolute time scale)

For reasons of comparison with our earlier studies, the speed and current deviation profiles at the absolute timescale are presented in Figure 4.7 (left panel). Replicating the findings of [Louveton, Bootsma, et al. \(2012\)](#); [Louveton, Montagne, et al. \(2012\)](#); and [Mathieu et al. \(2017, Experiment 2\)](#), the three offset conditions give rise to distinct speed profiles. In

the present study, such distinct speed profiles were in fact observed under all TTA and AC conditions. Inspection of Figure 4.7 revealed that speeds differed from very early on in the approach phase and that these differences increased over time. Early Offset resulted in a reduction in speed, followed by an increase when getting closer to the intersection. No Offset resulted in a gradual increase in speed that was amplified closer to the intersection. Late Offset led to a marked early increase in speed and then another increase closer to the intersection.

The results also revealed different speed profiles as a function of TTA and AC. Participants took advantage of a vehicle with high AC and reached a higher speed in the last 2.5 s before they crossed the intersection. Speed adjustments were more gradual when TTA was long, due to the ability to distribute them over a longer period.

Inspection of the corresponding current deviation profiles in Figure 4.7 (right panel) indicated that the speed adjustments described earlier had the effect of allowing participants to target a restricted zone of the gap, located near to the center but slightly closer to the lead vehicle. Globally, profiles showed a gradual reduction in current deviation up to values close to 0, reflecting the functional nature of speed adjustments, followed by an increase in the final seconds, allowing participants to cross the intersection in the first half of the inter-vehicular traffic interval.

TTA and AC nevertheless also modulated current deviation profiles, which could be differentiated at the beginning of the trial as a function of AC (see Figure 4.7). Profiles were shifted left when AC was high, reflecting a lower initial speed. Although surprising at first glance (the initial speed was imposed), this observation mirrors the fact that speed adjustments occurred very early in the trial (i.e., within the first second).

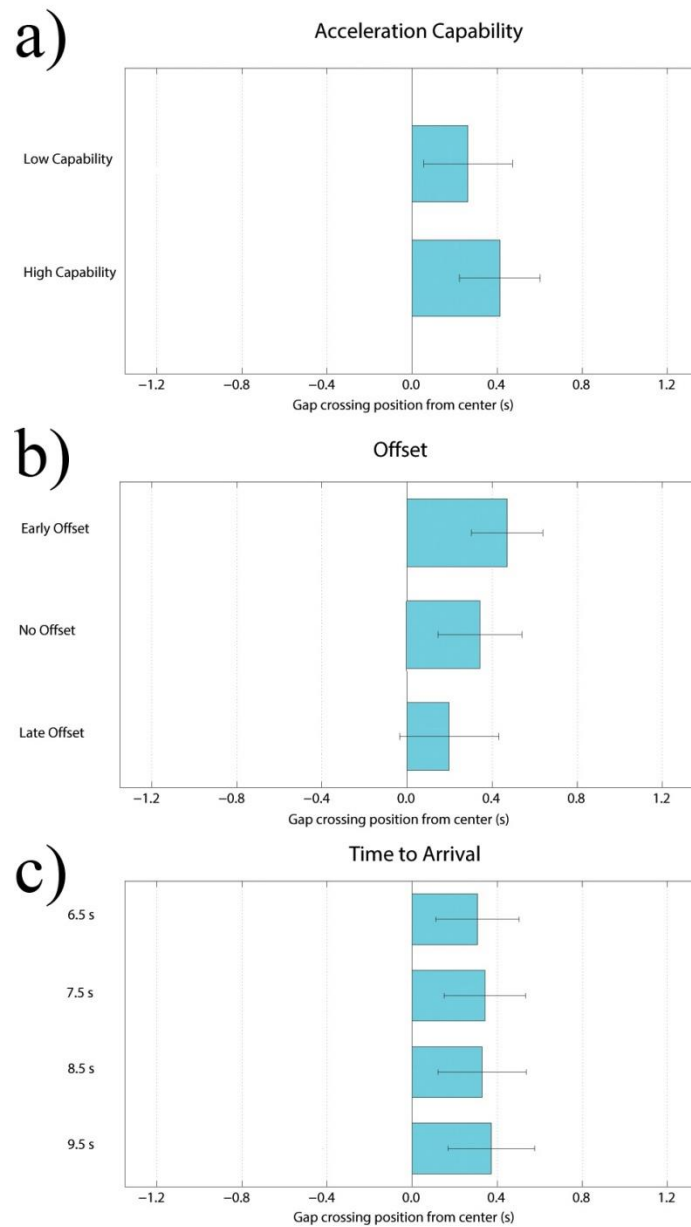


Figure 4. 6 : Gap-crossing position as a function of acceleration capability (a), offset (b), and Time to Arrival (c). Error bars indicate inter-participant standard deviation.

The speed averaging procedure used (cf., method section) allowed such early adjustments to affect the initial speed value. Surprisingly, this was the case regardless of Offset (i.e., even with Early Offset requiring deceleration), although the deceleration capabilities of all vehicles were identical. Conversely, current deviation profiles were far more similar in the second part of the approach.

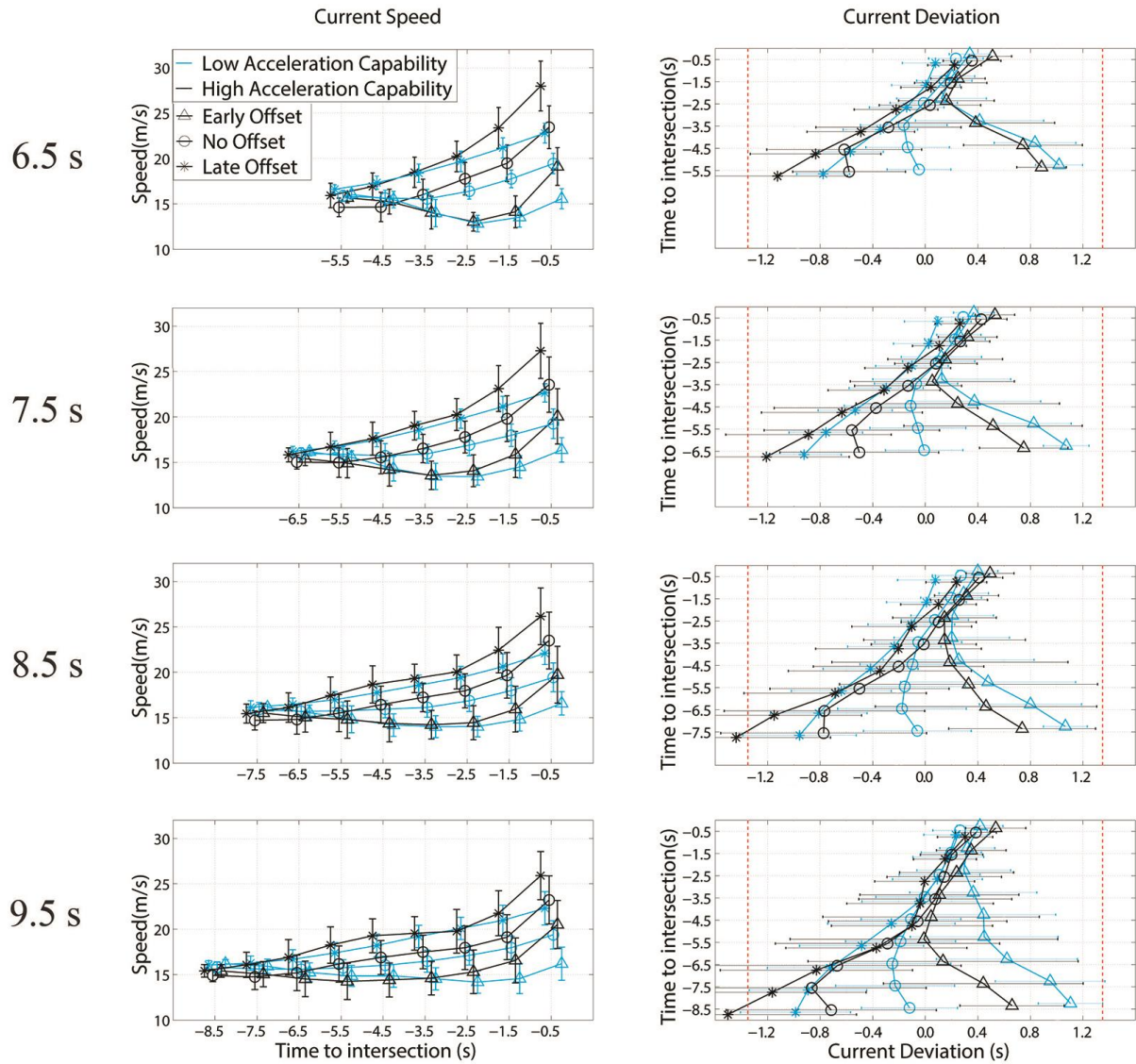


Figure 4. 7 : Average current speed (left panel) and average current deviation (right panel) as a function of the absolute time to reach the intersection. Error bars indicate inter-participant standard deviation.

It is interesting to note that TTA also appeared to play a role; initial drift in current deviation was better tolerated when TTA was long (e.g., 9.5 s) and therefore speed adjustments were more feasible. Conversely, with short TTA (e.g., 6.5 s) initial drift was rather limited as it was more difficult to compensate later.

The different trial durations did not allow seeking statistical confirmation of the observed effects of Offset, AC and TTA on speed and current deviation profiles at the absolute time scale. We therefore now turn to the time-normalized results.

Speed and current deviation profiles (relative timescale)

Statistical analysis of the time-normalized data confirmed the observations provided in the previous paragraph.

Speed profiles

The ANOVA conducted on speed revealed statistically and substantially significant main effects for all four factors: Offset ($F(1.14, 12.49) = 1026.55, p < .001, \eta^2_p = .99$), Time Step ($F(1.29, 14.16) = 45.37, p < .001, \eta^2_p = .80$), AC ($F(1, 11) = 14.68, p < .01, \eta^2_p = .57$) and TTA ($F(2.15, 23.60) = 5.86, p < .01, \eta^2_p = .35$). It also demonstrated significant first-order interactions for Time Step x Offset ($F(3.80, 41.76) = 166.34, p < .001, \eta^2_p = .94$), TTA x Offset ($F(3.57, 39.27) = 38.74, p < .001, \eta^2_p = .78$), AC x Time Step ($F(1.39, 15.31) = 11.99, p < .001, \eta^2_p = .52$), and Time Step x TTA ($F(3.47, 38.21) = 8.99, p < .001, \eta^2_p = .45$), as well as a significant second-order interactions for Time Step x TTA x Offset ($F(5.86, 64.42) = 3.87, p < .001, \eta^2_p = .26$).

Post hoc analyses of the first-order interactions confirmed that speed adjustments differed as a function of Offset. Between Q1 and Q3 speed decreased (by 2.58 m/s on average, $p < .001$), remained unchanged ($p > .1$) and increased (by 2.78 m/s on average, $p < .001$), in the Early, No and Late Offset conditions, respectively (Figure 4.8a). Conversely, speed increased systematically (by 3.57 m/s on average, $p < .001$) between Q3 and Q4

regardless of Offset. While AC did not affect adjustments between Q1 and Q3 (all $p > .1$), the speed increase produced between Q3 and Q4 was even greater (by 2.16 m/s on average) for high AC (all $p < .001$), especially when TTA was short (Figure 4.8b). The post hoc analysis of the Time Step x TTA x Offset interaction confirmed that speed adjustments during the approach due to different Offsets were largely comparable regardless of TTA. Only Late Offset resulted in a higher final (Q4) speed (+1.88 m/s and +2.21 m/s) for a short TTA (i.e., 6.5 s) than for the longest TTAs (8.5 s and 9.5 s; $p < .001$; Figure 4.8c).

Current deviation

The ANOVA on current deviation revealed statistically and substantially significant main effects for Offset ($F(1.71, 18.76) = 263.35, p < .001, \eta^2_p = .96$), Time Step ($F(1.71, 18.81) = 16.01, p < .001, \eta^2_p = .59$), and AC ($F(1, 11) = 7.57, p < .05, \eta^2_p = .41$). The main effect of TTA was not significant ($p > .38, \eta^2_p = .09$). The analysis also showed first-order interactions for Time Step x Offset ($F(3.77, 41.46) = 209.61, p < .001, \eta^2_p = .95$), AC x Time Step 485 ($F(2.02, 22.17) = 4.95, p < .01, \eta^2_p = .31$), and Time Step x TTA ($F(2.57, 28.28) = 4.40, p < .001, \eta^2_p = .29$).

Post hoc analysis of the first-order interactions showed that current deviation profiles were different in the three Offset modalities (Figure 4.9). Between Q1 and Q3, current deviation decreased by 0.89 s ($p < .001$), remained constant ($p > .1$), and decreased by 0.74 s ($p < .001$) in Early, No, and Late Offset conditions, respectively, once again reflecting the functional nature of speed adjustments. Conversely, current deviation increased indiscriminately (i.e., regardless of offset) in Q4. This pattern was modulated by AC. When AC was high, current deviation was higher in Q2, under Late and No Offset conditions (0.40

s; $p < .001$), and the increase in current deviation between Q3 and Q4 was higher (0.48 s; $p < .001$). Both results reflect participants' ability to harness the power of the vehicle to the extent that their lateness in Q2 could be offset by a subsequent acceleration. Similarly, a final high acceleration allowed participants to cross the inter-vehicular traffic gap a little more safely.

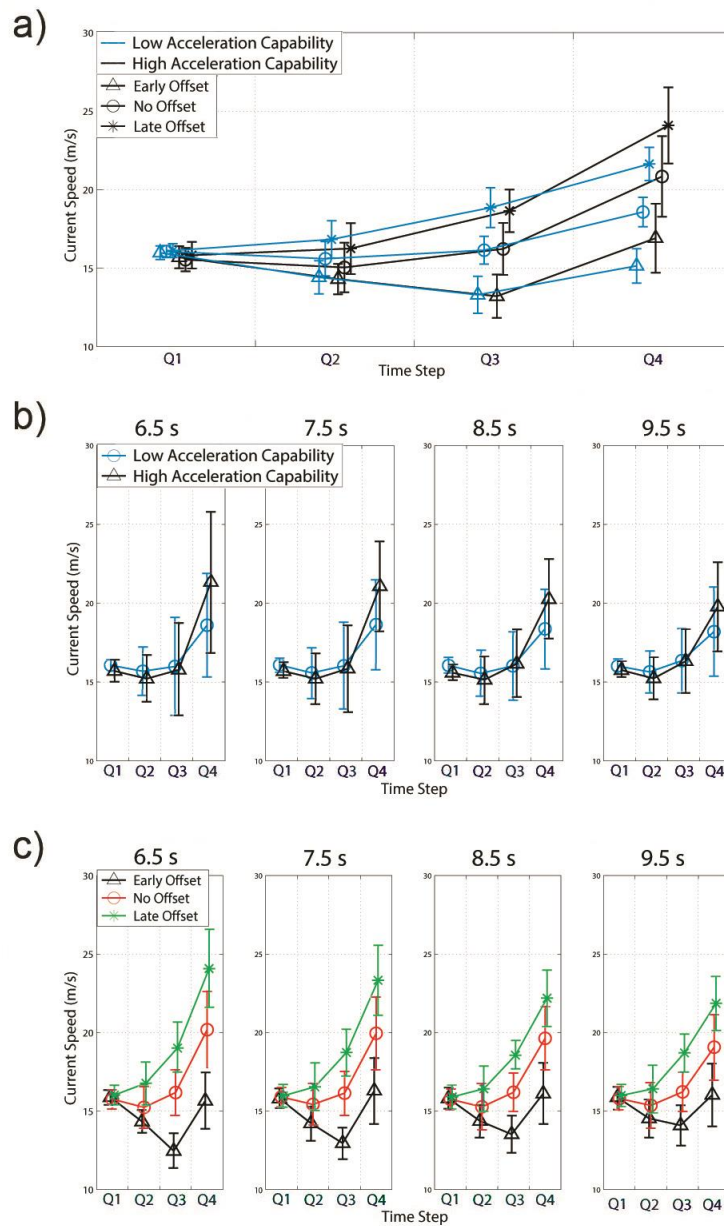


Figure 4. 8 : Average current speed as a function of relative time for AC, Time Step, and Offset (a); AC, TTA, and Time Step (b); and Offset, TTA, and Time Step (c). Error bars indicate inter-participant standard deviation.

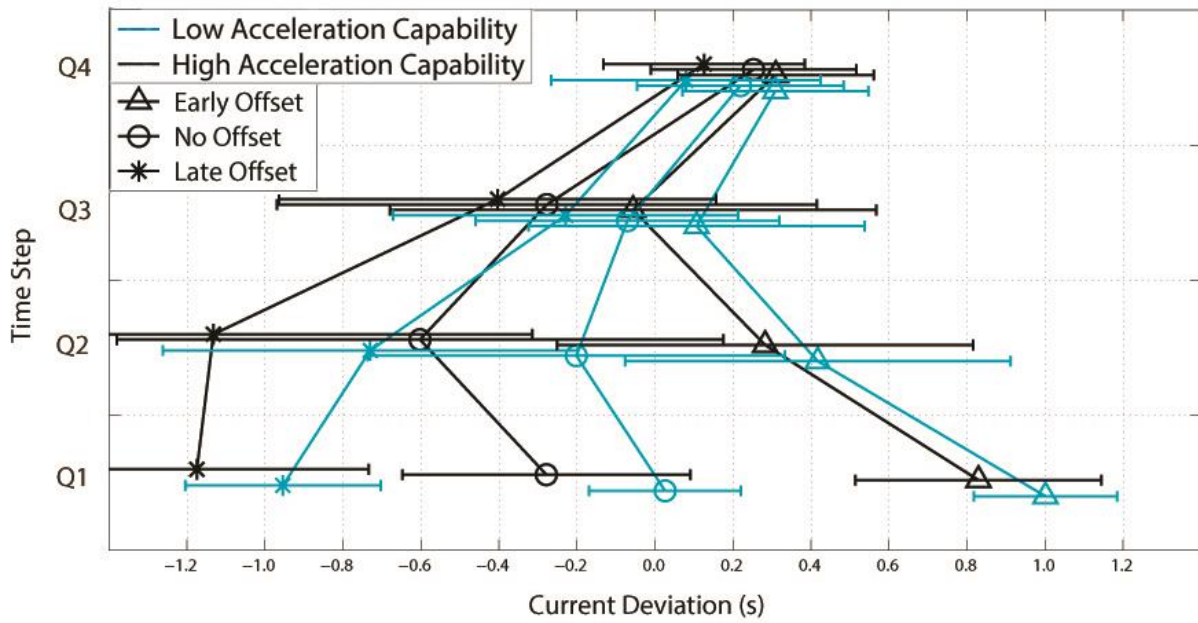


Figure 4. 9 : Average current deviation for Time Step, AC, and Offset. Error bars indicate inter-participant standard deviation.

Variability of speed

The ANOVA on between-trial variability of speed revealed statistically and substantially significant main effects for AC ($F(1, 11) = 69.65, p < .001, \eta^2_p = .86$), Time Step ($F(2.45, 26.97) = 57.46, p < .001, \eta^2_p = .84$), Offset ($F(1.77, 19.52) = 3.81, p < .05, \eta^2_p = .26$), and TTA ($F(2.23, 24.56) = 3.07, p < .05, \eta^2_p = .22$). It also highlighted significant interactions for Offset x Time Step ($F(2.53, 27.86) = 6.67, p < .001, \eta^2_p = .38$) and AC x Time Step ($F(2.11, 23.24) = 4.19, p < .05, \eta^2_p = .28$).

Post hoc analysis of the AC x Time Step interaction indicated that, for both ACs, the standard deviation of current speed increased between Q1 and Q2 (0.46 m/s; $p < .01$) and then stabilized between Q2 and Q3 ($p > .1$; Figure 4.10a). Conversely, it only increased between Q3 and Q4 when AC was high (0.40 m/s; $p < .001$). Finally, we observed that speed variability was higher by +0.61 m/s when AC was high ($p < .01$).

Post hoc analysis of the Offset x Time Step interaction indicated an increase in speed variability between Q1 and Q2 and between Q3 and Q4 in Early and No Offset conditions ($p < .01$; Figure 4.10b). In the Late Offset condition, it increased between Q1 and Q3 ($p < .05$).

Variability of current deviation

The ANOVA on between-trial variability in current deviation revealed statistically and substantially significant main effects for AC ($F(1, 11) = 91.94, p < .001, \eta^2_p = .89$), Time Step ($F(2.02, 22.18) = 41.31, p < .001, \eta^2_p = .79$), and TTA ($F(2.55, 28.02) = 29.00, p < .001, \eta^2_p = .72$). The substantial main effect of Offset ($F(1.67, 18.39) = 3.43, p = .051, \eta^2_p = .24$) came close to the statistical significance level. The analysis also revealed significant first order interactions for AC x Time Step ($F(2.19, 24.11) = 10.39, p < .001, \eta^2_p = .49$), TTA x Time Step ($F(4.28, 47.12) = 5.09, p < .001, \eta^2_p = .32$), and AC x TTA ($F(2.41, 47.12) = 3.95, p < .05, \eta^2_p = .26$).

Analysis of the AC x Time Step interaction (Figure 4.11a) indicated that the variability in current deviation was higher when AC was high in Q1 to Q3 (0.23 s on average; $p < .001$), but the final variability (Q4) was similar regardless of AC ($p > .99$). Furthermore, the pattern of change was the same for both ACs, with an increase from Q1 to Q2 (average increase of 0.20 s; $p < .01$), stabilization between Q2 and Q3 ($p > .1$), and a decrease between Q3 and Q4 (mean decrease of 0.24 s; $p < .01$).

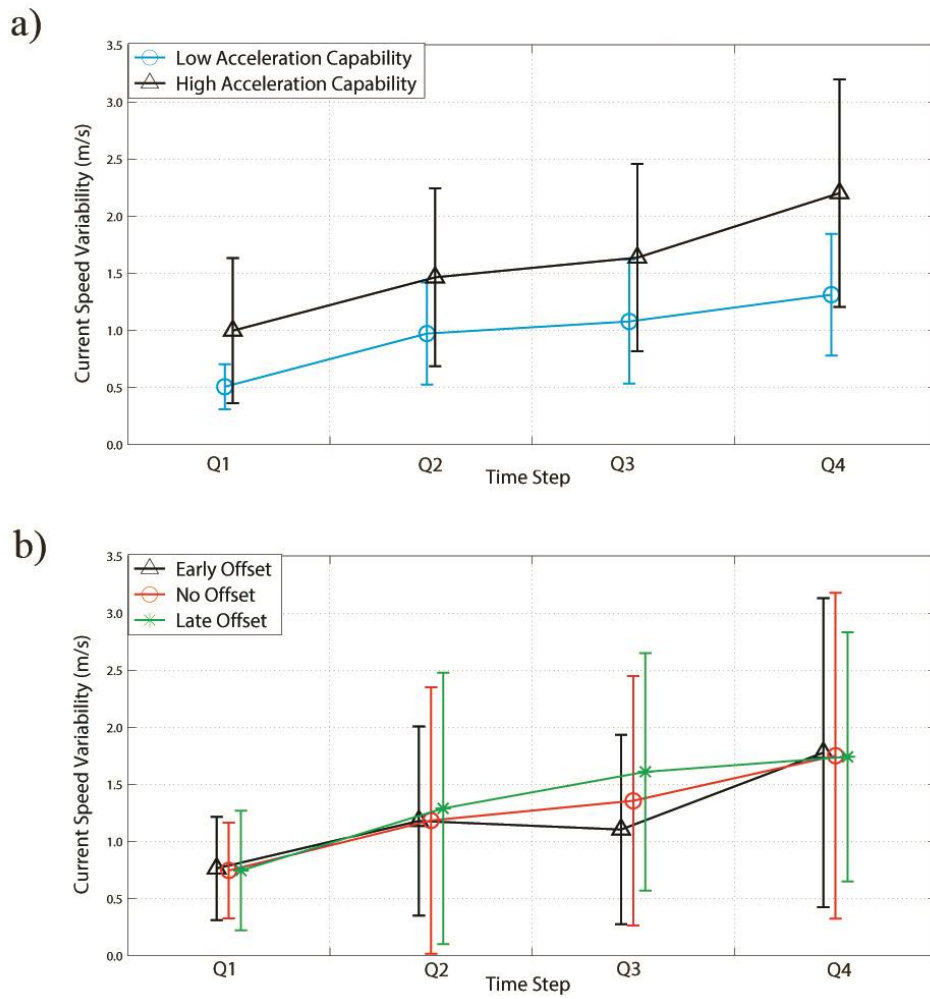


Figure 4. 10 : Average intraparticipant current speed variability for Time Step and AC (a) and Offset and Time Step (b). Error bars indicate inter-participant standard deviation.

Post hoc analysis of the TTA x Time Step interaction (Figure 4.11b) indicated globally equivalent patterns of change for all TTAs: increased variability between Q1 and Q2, stabilization between Q2 and Q3, and a decrease between Q3 and Q4. However, in Q2 variability was lower for TTA 6.5 s than for 8.5 s and 9.5 s (differences of 0.24 s and 0.30 s, respectively; $p < .001$). In other time intervals (Q1, Q3, and Q4) the variability in current deviation did not differ as a function of TTA.

Post hoc analysis of the AC x TTA interaction (Figure 4.11c) indicated that the variability in current deviation was higher when AC was high (0.18 s on average; $p < 0.5$) for

all four TTAs. Moreover, with low AC, it was lower for TTA 6.5 s than for 9.5 s (a difference of 0.12 s; $p < .05$). With high AC, it was lower for TTA 6.5 s than for 8.5 s and 9.5 s (a difference of 0.20 s and 0.24 s, respectively; $p < .001$).

Discussion

In this study we analyzed the adjustments (i.e., speed modulations) effected by drivers approaching and crossing an intersection with an incoming flow of traffic. Specifically, the goal was to identify specific markers of information–movement coupling by examining the participants' car kinematics during the approach phase up to intersection crossing. The implementation of such a coupling was not only hypothesized to result in a gradual gain in average accuracy during the approach (as already observed in earlier studies of intersection crossing) but also to give rise to opposing changes in between-trial variability in driving speed and current deviation. Indeed, the (between-trial) variability in (intermediate adjustment variable) speed was predicted to increase during the approach, whereas the (between-trial) variability in (task-level control variable) current deviation was predicted to concomitantly decrease. We also hypothesized that these effects would be mediated by the time allowed to perform the task (TTA) and the acceleration capabilities (AC) of the vehicle.

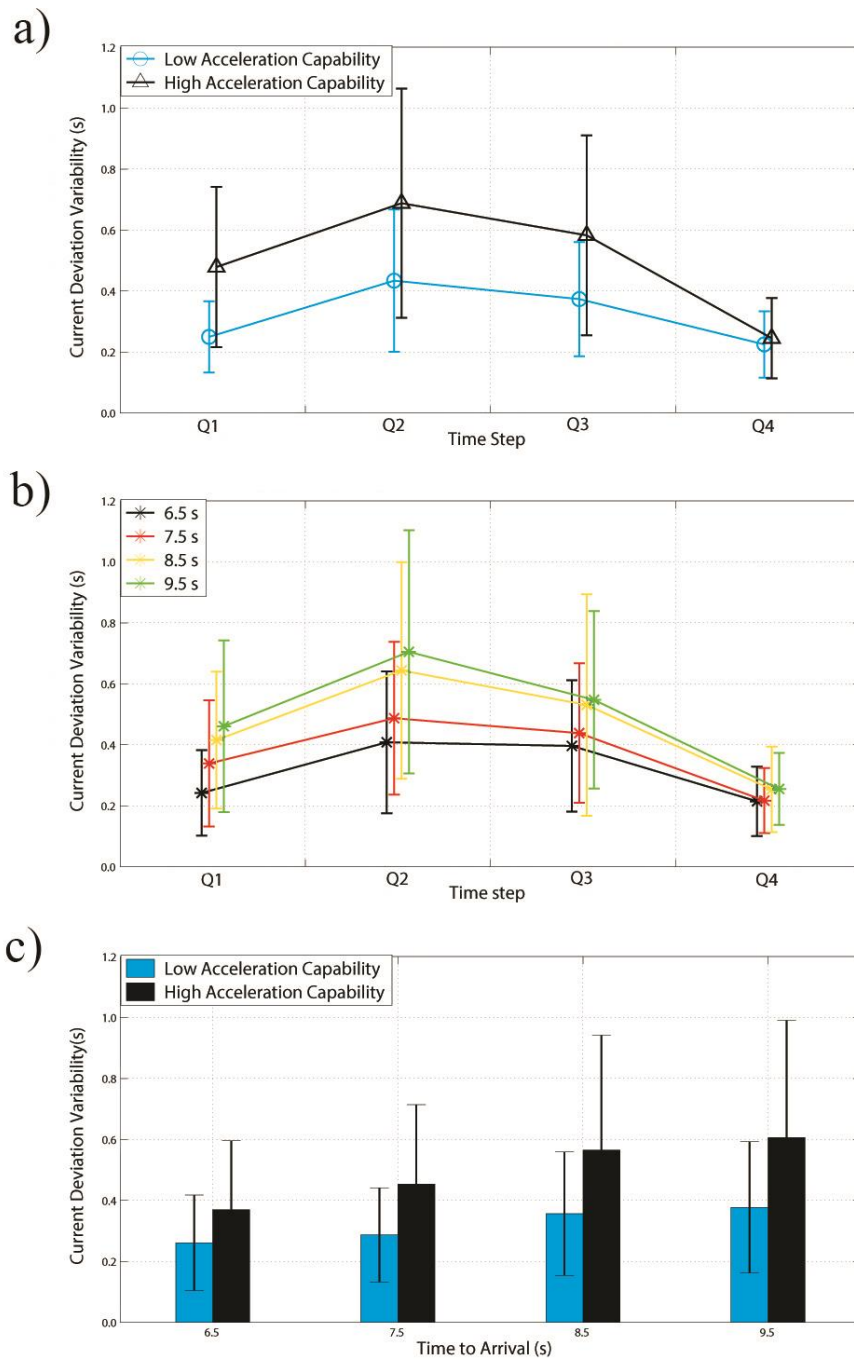


Figure 4. 11 : Average intra-participant standard deviation of current deviation for AC and Time Step (a), TTA and Time Step (b), and AC and TTA (c). Error bars indicate inter-participant standard deviation.

Improved accuracy

Our results confirmed and extended the results obtained in our previous work (Louveton, Bootsma, et al., 2012; Louveton, Montagne, et al., 2012; Mathieu et al., 2017, Experiment 2). They once again demonstrated that participants target a relatively restricted zone in the intervehicular traffic gap, located slightly before its center. As highlighted in the introduction section, targeting such a zone preserves a large margin of safety and allows sufficient time to cross the intersection (see Chihak et al., 2010, 2014, for similar results). The robustness of this result was clearly confirmed in the present study, exploring the effects of the time available until crossing (with initial traffic gap TTAs ranging from 6.5 s to 9.5 s) and the acceleration capabilities (AC) of the vehicle driven. Although task factors such as TTA and AC did affect the average position within the traffic gap where intersection is crossed to a certain extent, the effect was relatively small (mean gap crossing positions of +0.26 s vs. +0.41 s for low and high AC, respectively, and +0.31 s vs. +0.37 s for TTAs of 6.5 s and 9.5 s, respectively). Thus, despite the considerable differences in task conditions created by manipulation of the two factors, participants always passed the intersection in a rather limited zone within the traffic gap. These results were consistent with our previous findings (Louveton, Bootsma, et al., 2012; Louveton, Montagne, et al., 2012; Mathieu et al., 2017). Moreover, speed adjustments were once again found to be initiated early on and distributed throughout the approach phase. This became even clearer in the present contribution, with the exploration of driver behavior under conditions of different approach durations (i.e., TTAs). Interestingly, the distribution of speed adjustments over the available time span also resulted in driving behavior (i.e., speed profiles) that was largely independent of vehicles' acceleration capabilities during a large portion of the approach. Indeed, acceleration-

capability related differences only came to the fore when in the last seconds before crossing participants abruptly accelerated. This typical final acceleration, also observed in our earlier studies and in the studies of Chihak, Plumert, and colleagues ([Chihak et al., 2014](#); [Chihak et al., 2010](#)), appears to occur when participants have secured crossing within the traffic gap and might serve to maximize the safety margin by minimizing the time needed to cross the intersection.

Current deviation profiles confirmed that speed adjustments aimed to improve accuracy of the future position within the traffic gap. Overall, the results demonstrated a progressive reduction in current deviation (i.e., an improvement in accuracy) during the approach to the intersection. The increase in current deviation in the last seconds before crossing is the result of the abrupt final acceleration discussed earlier, targeting the identified comfort zone. Once again, the comparative analysis of current deviation profiles observed in different experimental conditions brought out both strong global similarities and some specific features reflecting experimental constraints (TTA and AC). When AC was high, participants seemed to tolerate a drift in current deviation at the beginning of the approach commensurate with the ample opportunity to regulate their speed later. Conversely, limited AC led them to restrict this drift in order to be able to make the speed adjustments necessary to carry out the task. Similar results were observed when TTA was manipulated; initial drift in current deviation was larger when TTA was longer, with longer TTA of course implying more time to make the necessary speed adjustments.

Change in variability patterns

In the present contribution we not only considered average participant behavior, as in our earlier studies on intersection crossing, but also focused on patterns of (within-participant between-trial) variability in the intermediate adjustment variable speed and the task level control variable current deviation. This novel analysis brought out a gradual increase over time in the variability of speed, whereas variability of current deviation evolved according to inverted U-like profile. In order to understand the latter profile, it is important to bear in mind that our procedure standardized both speed and current deviation at the outset of each trial. The initial (Q1) values of the between-trial variability in speed and current deviation were thus necessarily small and underestimated with respect to natural situations. Consequently, for present purposes we focused on the subsequent change (Q2 to Q4) in variability patterns. Consistent with our predictions, variability profiles revealed opposing characteristics; a progressive increase in the variability of speed was accompanied by a progressive reduction in the variability of current deviation that reached its lowest value in the last time interval before the crossing.

This pattern of results further reinforces the conclusion that speed adjustments (leading to increased variability) are functional, serving to target a specific zone in the traffic gap (leading to low variability in current deviation). The adjustments described here in the framework of intersection-crossing tasks are in all respects consistent with those described in the context of other tasks that necessitate the production of goal-directed movements (e.g., [Bardy & Laurent, 1998](#); [Bootsma & Van Wieringen, 1991](#); [Camachon, Buekers, & Montagne, 2004](#); [Chardenon, Montagne, Buekers, & Laurent, 2002](#); [Lee et al., 1982](#)). Most

important, the gradual reduction in the variability of the task-level control variable (i.e., funnel-like type of control) is a marker of control based on information–movement coupling.

The variability analysis also provided a tool to understanding how TTA and AC influenced the speed adjustments produced by participants and affected overall variability without altering its time profile. Under all experimental conditions, a concomitant and opposite change in variabilities of speed and current deviation was observed. In agreement with our hypotheses, the magnitude of variability prior to crossing was larger in higher AC and longer TTA conditions. Yet, variability in current deviation was always lowest at the very last moment before crossing. This latter result indicated that the operative conditions for task completion (here TTA and AC) modulated the tolerance associated with the implementation of the information–movement cycle. This tolerance was higher when adjustments could be distributed over a longer time but also when AC allowed rapid speed adjustments.

Implications for the identification of the underlying control mechanisms

Taken together, the results are fully consistent with the implementation of a control based on information–movement coupling. Speed adjustments gradually improve movement accuracy in such a way that the intervehicular traffic gap can be crossed safely. A flexible control mechanism is implemented, which can adapt the regulation behavior to the specific conditions that are encountered. Not only is this mechanism based on the consideration of an informational support that allows the agent to access, at any time, the state of their relationship with the environment but also task-related variables such as TTA

and AC modulate the effect of the coupling and consequently the adjustments that are produced.

Further studies will be necessary to identify precisely the perceptual substrate involved in this coupling. In order to test the contribution of potential information sources, such as the (rate of change of) optical size of traffic train vehicles or their bearing with respect to the driver's lane, such information sources could be manipulated over the course of a trial. The observed effects on speed regulation would help to move toward the formalization of a law of control.

We believe our results also provide a useful complement to recent studies that put action capabilities at the heart of the control process in goal-directed action (e.g., [Fajen, 2005, 2007](#); [Marti, Morice, & Montagne, 2015](#); [Morice, Diaz, Fajen, Basilio, & Montagne, 2015](#)). A goal of studies that aim to formalize control laws could therefore be to consider the capacity for action in the operationalization of the information–movement relation.

From a more applied point of view, our results could prove useful when designing adaptive driver assistance systems (ADAS) for use at intersections. Although the majority of the ADAS tested so far provided the drivers with cues related to the environment (e.g., the speed of approaching vehicles; [Houtenbos, de Winter, Hale, Wieringa, & Hagenzieker, 2017](#)), more powerful visual enhancements, that is, related to the state of the agent-environment system, could benefit the driver. We already tested the usefulness of this type of visual enhancements in the context of landing an airplane ([Huet, Jacobs, Camachon, Goulon, & Montagne, 2009](#); [Huet, Jacobs, Camachon, Missenard, Gray, & Montagne, 2011](#)). As a follow-up of these studies, the usefulness of ADAS providing the driver with an information related to the current deviation would certainly be worth considering.

Epilogue

5. Epilogue

L'objectif principal de ce travail de thèse est de parvenir à une meilleure compréhension des mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent la réalisation d'une tâche d'approche et de traversée d'intersection en conduite automobile. Plusieurs travaux récents ont révélé l'importance du dialogue perceptivo-moteur qui accompagne la réalisation de ce type de tâche (e.g., [Chihak et al., 2010, 2014](#) ; [Louveton, Montagne et al., 2012](#) ; [Louveton, Bootsma et al., 2012](#)). Notre travail de thèse s'inscrit dans le prolongement de ces études, il vise non seulement à caractériser plus finement le support perceptif utilisé à des fins de régulation, mais également à démontrer qu'un couplage information-mouvement sous-tend le contrôle des déplacements produits par les automobilistes. Trois expériences ont été réalisées sur un simulateur de conduite à base fixe.

Ce chapitre permet de faire un rappel rapide des principaux résultats obtenus au cours de nos travaux et de discuter des apports et des limites de ce travail de thèse. Pour conclure ce travail, des perspectives de recherche appliquées (e.g., conception de systèmes d'assistance à la conduite) dépassant le cadre de ce travail seront esquissées.

5.1. Principaux résultats

Les deux premières expériences étaient destinées à caractériser le support perceptif utilisé par les automobilistes lors de l'approche et de la traversée d'une intersection. Pour ce faire, nous avons analysé la manière avec laquelle des manipulations équivalentes (i.e., taille et type du véhicule qui approche) affectent le comportement des conducteurs dans des tâches perceptive et perceptivo-motrice. Dans la première expérience, les participants devaient effectuer une tâche de jugement de temps d'arrivée d'un véhicule, alors que dans

la deuxième expérience, ils devaient réaliser une traversée active d'intersection entre deux véhicules.

Les résultats obtenus sont conformes aux résultats de la littérature. Les conducteurs ont tendance à sous-estimer le temps d'arrivée d'un véhicule dans la tâche perceptive et cette sous-estimation est d'autant plus importante que le temps d'occultation du véhicule qui approche est important. Dans la tâche perceptivo-motrice, les conducteurs produisent des modulations fonctionnelles (i.e., parfaitement adaptées à la situation rencontrée) de leur vitesse de déplacement pendant toute l'approche et franchissent l'intervalle inter-véhiculaire près du centre avec un léger décalage en direction du véhicule qui ouvre l'intervalle. Si le contrôle de la phase d'approche avait reposé sur une succession d'estimation du temps restant avant l'arrivée du train de véhicules, le conducteur aurait dû produire une accélération (positive ou négative en fonction de l'offset) initiale plus importante que nécessaire, du fait d'une sous-estimation du temps restant pour procéder aux régulations. Le support perceptif utilisé pour réaliser une tâche perceptive diffère donc du support perceptif utilisé pour réaliser une tâche perceptivo-motrice.

Par ailleurs, la manipulation de la taille et du type de véhicule croisé ont affecté différemment l'estimation du temps d'arrivée du véhicule approchant et la cinématique du véhicule lors de l'approche de l'intersection. En effet, les participants avaient tendance à plus sous-estimer le temps d'arrivée du véhicule en présence d'un véhicule de grande taille ou d'une voiture, en comparaison avec un véhicule de petite taille ou une moto. Si le contrôle de la phase d'approche avait reposé sur des estimations successives du temps d'arrivée des véhicules, ces sous-estimations accrues du temps restant pour procéder aux régulations auraient dû conduire les participants à produire des patrons cinématiques

particuliers dans la tâche perceptivo-motrice. Nos résultats invalident cette hypothèse et plaident une nouvelle fois en faveur de la prise en compte d'un support perceptif spécifique (i.e., distinct de celui utilisé dans la tâche perceptive) lors de la réalisation de la tâche perceptivo-motrice.

En plus de parvenir à une meilleure compréhension du support perceptif utilisé lors de la réalisation d'un franchissement d'intersection, ces deux expériences nous ont permis de désambiguïser l'influence de la taille et du type de véhicule qui approche sur des tâches de jugement de temps d'arrivée et sur des tâches d'approche et de traversée d'intersection. Les résultats ont révélé qu'une partie des effets généralement attribués à la taille du véhicule croisé dans la littérature, pouvait en réalité être liée à la co-variation des facteurs taille et type de véhicule croisé. Le type de véhicule en tant que tel influence l'estimation du temps d'arrivée du véhicule. Nos résultats indiquent également que ces deux variables (i.e., taille et type de véhicule) affectent plus fortement les tâches de jugement de temps d'arrivée que des tâches perceptivo-motrices.

En conclusion de cette première partie expérimentale, nous pouvons faire le constat que la démonstration de la spécificité du support perceptif utilisé dans la réalisation d'une tâche perceptivo-motrice (en comparaison avec une tâche perceptive) donne une forte légitimité au choix de notre approche théorique. En effet, l'approche écologique de la perception et de l'action fait du maintien des liens entre perception et action une condition *sine qua non* à toute étude visant une meilleure compréhension des mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent la production du comportement.

La troisième expérience a permis quant à elle d'aller plus loin dans la description du dialogue perceptivo-moteur qui sous-tend le comportement lors de l'approche et de la traversée d'une intersection. L'analyse a porté sur l'identification de marqueurs indiquant la mise en œuvre d'un cycle information-mouvement : (i) un gain en précision en cours d'approche (i.e., diminution de la déviation courante) et (ii) une évolution opposée des patrons de variabilité inter-essais des variables de contrôle (i.e., déviation courante) et d'ajustement (i.e., vitesse courante).

L'amélioration graduelle de la précision en cours d'approche, *via* des ajustements de leurs vitesses de déplacement, a permis aux participants de traverser systématiquement l'intersection dans leur zone de confort au sein de la fenêtre inter-véhiculaire (i.e., légèrement à l'avant de la fenêtre), en dépit de conditions d'exécution extrêmement variables.

La deuxième partie de l'analyse a permis de décrire, comme anticipé, des patrons de variabilité opposés des variables de contrôle et d'ajustement. L'augmentation progressive de la variabilité de la vitesse de déplacement, s'accompagne d'une diminution de la variabilité de la déviation courante, qui atteint son niveau le plus bas au moment du franchissement. Ce résultat, comparable à celui décrit dans certaines habiletés sportives, indique que les ajustements de la vitesse de déplacement produits pendant toute la phase d'approche ont bien pour fonction de permettre aux participants de cibler la zone de l'espace inter-véhiculaire la plus propice à la réalisation d'un franchissement sûr.

Cette troisième expérience indique également que le temps disponible pour réaliser l'approche et les capacités d'accélération du véhicule conduit constituent des facteurs médiateurs ; ils n'affectent pas la forme des patrons de variabilité produits, mais influencent

le niveau de variabilité toléré par le système. A titre d'exemple, un conducteur au volant d'une voiture possédant une forte capacité d'accélération, s'accommodera de conditions initiales extrêmement variables, compte tenu du fait qu'il sera en mesure de produire des ajustements importants de la vitesse de déplacement ultérieurement au cours de l'approche.

Cette troisième expérience nous a permis d'apporter des preuves expérimentales qui traduisent la mise en œuvre d'une coopération étroite entre les versants perceptifs et moteurs lors de l'approche d'une intersection. Ces signatures du couplage information-mouvement sont comparables à celles déjà mises en évidence dans d'autres habiletés perceptivo-motrices complexes : phase d'approche au saut en longueur, salto arrière de pied ferme.

5.2. Synthèse et problématisation

Pris dans leur ensemble, nos résultats soulignent l'intérêt de la prise en compte conjointe des versants perceptifs et moteurs lorsque l'on souhaite mettre au jour les mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent le contrôle d'un déplacement finalisé. Dans cette optique, l'approche écologique de la perception et de l'action fournit un cadre conceptuel particulièrement adapté. Notre travail de thèse montre que la réalisation d'une tâche d'approche et de traversée d'intersection induit un dialogue permanent entre les versants perceptifs et moteurs. Or, la méthodologie employée dans les études antérieures (i.e., [Carel, 1961](#) ; [Schiff & Detwiler, 1979](#) ; [Caird & Hancock, 1994](#) ; [Horswill & Wann, 2005](#) ; [Van Loon, 2010](#) ; [Crundall et al., 2012](#) ; [Gould et al., 2013](#)) ne permettait pas de révéler ces mécanismes, car l'utilisation d'un paradigme d'extrapolation

supprimait de fait le lien naturel entre perception et action qui préside à la réalisation d'une action dans un contexte écologique. Les erreurs systématiques observées dans la littérature, mais également dans notre première expérience, dans des tâches d'estimation de temps d'arrivée, ne sont en aucun cas représentatives des processus mis en jeu lors de tâches de conduite plus écologiques dans lesquelles les liens entre information et mouvement sont préservés. Nous pensons que le cloisonnement des processus (i.e., l'usage d'une tâche exclusivement perceptive) contraint le conducteur à utiliser des mécanismes de plus haut niveau qui ne sont pas nécessairement mis en œuvre dans un contexte plus écologique. À l'inverse, lors de la réalisation d'une tâche perceptivo-motrice (expérience 2), les régulations produites sont fonctionnelles et conduisent le conducteur à cibler systématiquement la même zone de franchissement au sein de la fenêtre inter-véhiculaire.

Ces résultats nous renvoient à un grand débat présent dans la littérature à propos du concept d'anticipation. En effet, l'anticipation est bien souvent considérée comme étant la capacité à prédire un événement à venir (e.g., le temps d'arrivée d'un véhicule) à partir de signaux incomplets ([Poulton, 1957](#)). C'est en se référant à cette définition qu'un grand nombre de chercheurs ont utilisé un paradigme d'extrapolation afin d'étudier le comportement des automobilistes lors de la réalisation d'une manœuvre à une intersection (e.g., [Caird & Hancock, 1994](#)). Toutefois, alors que la plupart des études réalisées montrent que les jugements perceptifs donnent lieu à des réponses imprécises (e.g., [Welchman et al., 2004](#) ; [Harris & Drga, 2005](#)), les tâches perceptivo-motrices sont la plupart du temps réalisées avec une grande précision. Ces résultats confortent la thèse selon laquelle l'anticipation résiderait moins dans la capacité à prédire un événement futur, que dans la capacité à moduler continuellement son mouvement sur la base d'une information donnant

accès à l'état actuel de la relation agent-environnement (e.g., [Montagne et al., 2008](#)). Les travaux de Milner et Goodale (i.e., [Goodale & Milner, 1992](#) ; [Milner & Goodale, 1995](#)) donnent un éclairage neurophysiologique au concept d'anticipation. Pour rappel, le système visuel serait composé de deux voies aux fonctions bien distinctes. La voie ventrale soutiendrait la perception visuelle, alors que la voie dorsale interviendrait dans le contrôle visuel d'une action. Les tâches de jugement utilisées dans les recherches antérieures avaient donc pour conséquence de solliciter une voie neuro-anatomique, i.e., la voie ventrale, qui n'est pas (ou peu) sollicitée lors de du contrôle de la réalisation d'une action finalisée. Les mécanismes qui permettent à un agent d'anticiper lors de l'approche d'une intersection ne peuvent être étudiés que lorsque le lien information-mouvement est préservé.

Nos résultats apportent quelques éléments qui permettent de caractériser la nature de ce dialogue perceptivo-moteur. Les études réalisées précédemment sur l'interception d'un mobile se déplaçant horizontalement (e.g., [Bastin et al., 2006](#) ; [Bastin et al., 2008](#) ; [François et al., 2011](#)) ont permis d'identifier une loi de contrôle rendant compte de la plupart des régulations produites. Cette loi de contrôle propose que le participant module son accélération en prenant en compte le taux de changement de l'angle de relèvement afin d'intercepter un mobile. Théoriquement, le contrôle de la phase d'approche d'une intersection pourrait reposer sur un mécanisme équivalent, destiné à établir le 'contact' avec le centre de l'intervalle inter-véhiculaire et/ou à éviter une collision avec les bornes de ce même intervalle. Les résultats de nos expériences 2 et 3 indiquent que les participants réalisaient, lors de la phase d'approche, des régulations fonctionnelles de leur vitesse tout au long de la phase d'approche afin de traverser l'intersection dans une région sûre de la fenêtre inter-véhiculaire (i.e., proche du centre). Ces résultats sont compatibles avec

l'utilisation de la loi de contrôle pré-citée. Toutefois, alors que la manipulation de la taille et du type de véhicule croisé n'affectent pas le taux de changement de l'angle de relèvement, nos résultats indiquent que ces variables modulent (légèrement) les régulations produites. Nos résultats plaident en faveur de l'utilisation conjointe de plusieurs supports perceptifs. Même si la loi de contrôle basée sur la prise en compte de l'angle de relèvement rend compte de la plupart des régulations produites, d'autres informations sont prises en compte. L'influence du type de véhicule sur la nature des régulations produites est prototypique de la prise en compte de processus de haut niveau sur le contrôle de l'action. Alors que les contraintes spatio-temporelles associées à la réalisation de la tâche sont équivalentes, la manipulation du type de véhicule module le comportement des participants. Même si ces modulations sont minimales, elles indiquent que des mécanismes de haut niveau (i.e., attentes associées à un certain type de véhicule) interviennent de concert avec des mécanismes de plus bas niveau (i.e., loi de contrôle).

La troisième expérience nous a permis d'aller plus loin dans la caractérisation du cycle information-mouvement. Dans la quasi-totalité des études réalisées à ce jour, les protocoles visant à mieux décrire le cycle reposaient sur des manipulations de l'entrée perceptive (i.e., restriction ou dé-corrélation du support perceptif présent). La présence (l'absence) de modulations comportementales spécifiques validaient (invalidaient) le caractère fonctionnel de l'information manipulée. Nous avons pour notre part décidé d'étudier le cycle information-mouvement en manipulant le versant moteur *via* les capacités d'action du véhicule. Nos résultats montrent que les caractéristiques du véhicule conduit (i.e., capacité d'accélération) donnent lieu à des comportements de conduite spécifiques, toutefois les patrons de résultats (i.e., gain en précision continu et évolution des patrons de

variabilité) restent les mêmes quelles que soient les capacités d'action. Ces résultats révèlent une nouvelle fois le caractère imbriqué de l'information et du mouvement. Les potentialités d'action sont prises en compte par l'automobiliste afin de réguler son déplacement. Il est même possible de considérer que l'information est calibrée sur la base des potentialités d'action permises par le véhicule (Fajen, 2005). Ce résultat est particulièrement intéressant dans la mesure où la plupart des lois de contrôle formalisées à ce jour (parmi lesquelles la loi de contrôle dont il est question dans notre étude) ne prennent pas en compte les capacités d'action de l'agent ou du couple agent-véhicule. Ces lois de contrôle gagneraient à être 'bridées' en prenant en compte ces limites d'action, afin de donner lieu à des prédictions comportementales plausibles et à rendre compte au plus près du comportement de l'agent.

5.3. Perspectives

Depuis un certain nombre d'années, les équipementiers et les constructeurs automobiles travaillent pour lutter contre l'insécurité routière. Pour cela, ils développent des dispositifs de sécurité à la fois passifs (i.e., dispositif pour limiter la gravité des accidents) et actifs (i.e., pour éviter les accidents). Ces derniers sont plus communément appelés systèmes d'assistance à la conduite (i.e., ADAS, Advanced Drivers Assistance System). Ces nouveaux systèmes sont en pleine expansion actuellement puisqu'ils devraient connaître une progression annuelle moyenne de 41% sur les sept prochaines années (<https://www.abiresearch.com/>). Ces systèmes d'assistance à la conduite sont des dispositifs intégrés dans le véhicule permettant d'informer ou d'assister le conducteur afin (i) d'éviter l'apparition d'une situation dangereuse, ou (ii) de limiter les tâches pouvant altérer sa

vigilance, ou encore améliorer sa perception. Les résultats obtenus lors de cette thèse pourraient permettre à l'avenir de réaliser des recherches appliquées afin de développer des dispositifs d'aide à la conduite.

En effet, nous avons pu caractériser le comportement de régulation des automobilistes lors de l'approche et de la traversée d'une intersection. Ces connaissances pourraient permettre l'élaboration d'ADAS de nouvelle génération permettant de minimiser les risques d'accident aux abords de l'une des infrastructures routière les plus dangereuses, l'intersection.

5.3.1. ADAS et comportement de conduite

D'après les constructeurs automobiles, les ADAS permettraient de limiter grandement les risques d'accident liés aux erreurs humaines en automatisant de plus en plus la conduite automobile (e.g., mauvaise perception, décision incorrecte). Or, d'après certaines études portant sur les adaptations comportementales des automobilistes en présence d'ADAS (i.e., [Sullivan, Flannagan, Pradhan & Bao, 2016](#) pour une revue de littérature), l'incidence de ces systèmes sur la sécurité serait bien souvent inférieure aux avantages escomptés. Selon ces études, ce résultat serait en partie lié à des modifications du comportement (i.e., adaptations comportementales) de conduite des automobilistes en présence d'ADAS. Ainsi, il est possible de voir émerger des comportements de contentement (i.e., niveau de confiance trop important en l'assistance) et de sur-généralisation (i.e., surestimation des capacités de l'assistance) entraînant une inhibition du comportement de conduite des automobilistes. Ces systèmes pourraient également entraîner des comportements de contournement de l'assistance. En effet, les automobilistes peuvent

adopter un comportement inhabituel afin de réduire l'interférence entre lui et l'assistance qu'il juge indésirable (e.g., [Saad & Villame, 1999](#)). D'autres ADAS permettent d'améliorer les performances des véhicules conduit (e.g., l'ABS permet d'éviter le blocage des roues et de diminuer les distances de freinage) et donneraient un surplus de confiance au conducteur qui aurait tendance à rouler plus vite (i.e., [OECD, 1990](#)). En résumé, une grande partie des ADAS actuels induisent des modifications du comportement de conduite des automobilistes pouvant être délétères.

5.3.2. ADAS et tâche de guidage visuel

Le comportement de conduite le plus étudié en présence d'ADAS correspond à la réalisation de tâches de guidage (i.e., contrôle latéral et longitudinal ; [Navarro, Francois & Mars, 2016](#) ; [Sullivan et al., 2016](#)). Ainsi, pour le contrôle longitudinal, certains véhicules sont équipés d'un contrôle de vitesse adaptatif (i.e., ACC). Cet ADAS permet de réguler la vitesse de la voiture en fonction des obstacles rencontrés (e.g., voiture à l'avant). Mais, ce système n'est pas infallible. En effet, les capteurs utilisés pour détecter les obstacles peuvent ne pas fonctionner lors de virages serrés, lorsque les obstacles sont « petits », se déplacent lentement (e.g., bicyclette, piéton) ou encore en présence d'intempéries (e.g., pluie). Or, de nombreuses études montrent qu'en cas de défaillance de l'ACC, les automobilistes mettent plus de temps à réagir (i.e., entre +0.6 et +0.8 s) que dans les conditions dans lesquelles ils conduisaient sans assistance (e.g., [Rudin-Brown & Parker, 2004](#) ; [Larsson, Kircher & Hultgren, 2014](#)). De plus, le mouvement oculaire traduisant la prise d'information dans l'environnement n'était pas le même lorsque les participants conduisaient un véhicule avec un ADAS qu'un véhicule avec un contrôle manuel (i.e., [Navarro et al., 2016](#)).

Plus récemment, certains ADAS ayant pour fonction de limiter les accidents aux niveaux des intersections ont vu le jour (e.g., projet de recherche INTERSAFE-2 pour plus de détails). Ces dispositifs se basent sur un dialogue entre les véhicules et l'infrastructure (i.e., intersection). Ainsi, si le conducteur adopte un comportement dangereux, il recevra un avertissement sonore, puis un avertissement visuel et, s'il ne rectifie pas son comportement le véhicule freinera de lui-même.

5.3.3. Développement d'un ADAS innovant

La majorité des ADAS existant sont centrés sur les capacités technologiques se basant essentiellement sur un dialogue entre les véhicules et l'environnement sans tenir compte des caractéristiques de l'automobiliste. Ainsi, leur objectif sur le long terme, serait d'automatiser totalement la conduite automobile. Or, au regard des résultats de nos travaux ainsi que ceux réalisés sur le comportement de conduite des automobilistes en présence d'ADAS, il semble important de développer des systèmes d'assistance maintenant le dialogue avec l'automobiliste (i.e., coopération Homme-machine ; [Navarro, 2016](#)). En effet, nos résultats démontrent la nécessité de maintenir le lien entre la perception et l'action lors de la réalisation d'une tâche de traversée d'intersection. Ainsi, bien que nous n'ayons pas encore modélisé de loi de contrôle, nous avons caractérisé les comportements de régulation des automobilistes lors de la phase d'approche et de traversée d'intersection. La prise en compte des mécanismes perceptivo-moteurs sous-jacents semble cruciale pour l'acceptation de l'ADAS par l'automobiliste et pour une bonne coopération entre ces deux « agents ». Pour cela, la création d'un prototype d'ADAS basé sur mode « perceptif » (e.g., [Houtenbos, Winter, Hale, Wieringa & Hagenzieker, 2017](#)) permettrait d'accroître les capacités sensorielles du conducteur, à l'aide d'informations artificielles visuelles, auditives, haptiques

ou multimodales (i.e., [Sigrist, Rauter, Riener & Wolf, 2012](#) pour une revue de littérature), sans le brider ou le remplacer. En effet, d'après [Magill \(1993\)](#) l'utilisation d'un artifice extérieur permettrait d'augmenter la sensibilité d'un agent aux événements sensoriels qui accompagnent la performance (i.e., la réussite de la tâche).

5.3.4. Applications d'un ADAS basé sur un mode perceptif

Le développement d'un ADAS basé sur un mode perceptif pourrait avoir de nombreuses applications dont deux semblent particulièrement intéressantes. La première pourrait être utilisée à des fins d'apprentissage pour les conducteurs novices. L'ADAS développé permettrait d'éduquer l'attention des jeunes automobilistes vers les informations pertinentes présentes dans leur environnement. Cela accélérerait la mise en œuvre de processus perceptivo-moteurs qui sous-tendent le contrôle de l'approche et de la traversée d'intersection grâce à une variable spécifique telle que l'angle de relèvement. Pour cela, l'ajout d'une information artificielle dans l'environnement du conducteur pourrait faciliter la détection des informations utiles au contrôle de l'action ainsi que la calibration du conducteur sur celle-ci. Des études semblent indiquer que l'apprentissage peut être amélioré à condition d'afficher l'information artificielle à la demande de l'apprenant (i.e., Feedback à la demande ; [Huet, Jacobs, Camachon, Goulon & Montagne, 2009](#) ; [Huet, Camachon, Goulon & Montagne, 2009](#)). Ainsi, le feedback apparaîtrait uniquement lorsque l'apprenant en fait la demande en pressant un bouton positionné sur le comodo par exemple. L'ADAS pourrait également être utilisée afin de corriger d'éventuelles erreurs de contrôle longitudinal de la part des conducteurs experts lors de la phase d'approche d'une intersection. Pour cela, une information artificielle adaptative pourrait être utilisée. Ainsi, lors de la phase d'approche vers une intersection, un feedback apparaîtrait uniquement si la

Epilogue

vitesse d'approche de l'automobiliste s'éloigne de la vitesse requise pour réussir la traversée sans entrer en collision avec un autre véhicule.

Bibliographie

Bibliographie

- Aldcroft, D. H. (2012). Twentieth-Century Transport Revolution. *Arts: The Journal of the Sydney University Arts Association*, 10.
- Arnone, W.L. (1994). Assessment of time-to-arrival and “margin of safety” gaps for left turns in younger and older drivers. Unpublished Ph.D. dissertation. New York University.
- Bardy, B. G., & Laurent, M. (1998). How is body orientation controlled during somersaulting? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 963–977.
- Basilio, N., Morice, A. H., Marti, G., & Montagne, G. (2015). High-and low-order overtaking-ability affordances: drivers rely on the maximum velocity and acceleration of their cars to perform overtaking maneuvers. *Human factors*, 57(5), 879-894.
- Bastin, J., & Montagne, G. (2005). The perceptual support of goal-directed displacement is context-dependent. *Neuroscience Letters*, 376(2), 121-126.
- Bastin, J., Calvin, S., & Montagne, G. (2006). 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., & Montagne, G. (2006). Prospective strategies underlie the control of interceptive action. *Human Movement Science*, 25, 718–732.
- Bastin, J., Jacobs, D. M., Morice, A. H., Craig, C., & Montagne, G. (2008). Testing the role of expansion in the prospective control of locomotion. *Experimental Brain Research*, 191(3), 301-312.
- Beek, P. J., Peper, C. E., Daffertshofer, A., Van Soest, A. J., & Meijer, O. G. (1998). Studying perceptual-motor actions from mutually constraining perspectives. *Models in human movement sciences*, 93-111.
- Berg, W. P., Wade, M. G., & Greer, N. L. (1994). Visual regulation of gait in bipedal locomotion: Revisiting Lee, Lishman, and Thomson (1982). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(4), 854-863.
- Berthelon, C., & Mestre, D. (1993). Curvilinear approach to an intersection and visual detection of a collision. *Human Factors*, 35, 521–534.
- Berthelon, C., Mestre, D., & Taramino, R. (1995). Anticipation visuelle de collisions en situations simulées: effets de l'expérience de la conduite. *Le Travail Humain*, 311-337.
- Berthelon, C., Bocca, M. L., Denise, P., & Pottier, A. (2003). Do zopiclone, zolpidem and flunitrazepam have residual effects on simulated task of collision anticipation?. *Journal of Psychopharmacology*, 17(3), 324-331.

Bibliographie

- Bingham, G. P., & Stassen, M. G. (1994). Monocular egocentric distance information generated by head movement. *Ecological psychology*, 6(3), 219-238.
- Bootsma, R. J. (1989). Accuracy of perceptual processes subserving different perception-action systems. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 41, 489-500.
- Bootsma, R. J. (1998). Ecological movement principles and how much information matters. In A. A. Post, J. R. Pijpers, P. Bosch, & M. S. J. Boschker (Eds.), *Models in Human Movement Science* (pp. 51-63). Enschede: PrintPartners Ipskamp.
- Bootsma, R. J. (2009). The (current) future is here! *Perception*, 38, 851.
- Bootsma, R. J., & Van Wieringen, P. C. W. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 21-29.
- Bootsma, R. J., Houbiers, M. H. J., Whiting, H. T. A., & Van Wieringen, P. C. W. (1991). Acquiring an attacking forehand drive: the effects of static and dynamic environmental conditions. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 62, 276-284.
- Bootsma, R. J., Ledouit, S., Casanova, R., & Zaal, F. T. J. M. (2016). Fractional-order information in the visual control of lateral locomotor interception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42, 517-529.
- Brendel, E., De Lucia, P. R., Hecht, H., Stacy, R. L., & Larsen, J. T. (2012). Threatening pictures induce shortened time-to-contact estimates. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74, 979-987.
- Brendel, E., Hecht, H., De Lucia, P. R., & Gamer, M. (2014). Emotional effects on time-to-contact judgments: Arousal, threat, and fear of spiders modulate the effect of pictorial content. *Experimental Brain Research*, 232, 2337-2347.
- Brown, I. D., & McFaddon, S. M. (1986). Display parameters for driver control of vehicles using indirect viewing. *Vision in Vehicles*, 265-274.
- Brown, I. D., & Groeger, J. A. (1988). Risk perception and decision taking during the transition between novice and experienced driver status. *Ergonomics*, 31(4), 585-597.
- Bruno, N., Bernardis, P., & Gentilucci, M. (2008). Visually guided pointing, the Müller-Lyer illusion, and the functional interpretation of the dorsal-ventral split: conclusions from 33 independent studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 32(3), 423-437.
- Camachon, C., Buekers, M. J., & Montagne, G. (2004). Is the learning of goal-directed displacement effector independent? *Human Movement Science*, 23, 239-255.
- Caird, J. K., & Hancock, P. A. (1994). The perception of arrival time for different oncoming vehicles at an intersection. *Ecological Psychology*, 6, 83-109.

Bibliographie

- Caird, J. K., & Hancock, P. A. (2002). Left turn and gap acceptance crashes. In P. Olson, & E. Dewer (Eds.), *Human factors in traffic safety* (pp. 613–652). Tucson, AZ: Lawyers & Judges Publishing Company.
- Carel, W. L. (1961). Visual factors in the contact analog. *Technical Information Series*, R61ELC60.
- Cavallo, V., & Laurent, M. (1988). Visual information and skill level in time-to-collision estimation. *Perception*, 17, 623–632.
- Chandler, B. E., Myers, M. C., Atkinson, J. E., Bryer, T. E., Retting, R., Smithline, J., ... & Sunkari, S. (2013). *Signalized Intersections Informational Guide*, FHWA-SA-13-027.
- Chardenon, A., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2002). The visual control of ball interception during human locomotion. *Neuroscience Letters*, 334, 13–16.
- Chardenon, A., Montagne, G., Laurent, M., & Bootsma, R. J. (2004). The perceptual control of goal-directed locomotion: a common architecture for interception and navigation? *Experimental Brain Research*, 158, 100–108.
- Chardenon, A., Montagne, G., Laurent, M., & 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., & 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, 1535–1552.
- Chihak, B. J., Grechkin, T. Y., Kearney, J. K., Cremer, J. F., & Plumert, J. M. (2014). How children and adults learn to intercept moving gaps. *Journal of Experimental Child Psychology*, 122, 134–152.
- Clark, H. E., Perrone, J. A., & Isler, R. B. (2013). An illusory size-speed bias and railway crossing collisions. *Accident Analysis and Prevention*, 55, 226–231.
- Clark, H. E., Perrone, J. A., Isler, R. B., & Charlton, S. G. (2016). The role of eye movements in the size-speed illusion of approaching trains. *Accident Analysis and Prevention*, 55, 226–231.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd Ed. Hillsdale NJ: Erlbaum.
- Connelly, M. L., Conaglen, H. M., Parsonson, B. S., & Isler, R. B. (1998). Child pedestrians' crossing gap thresholds. *Accident Analysis & Prevention*, 30(4), 443-453.
- Crundall, D., Humphrey, K., & Clarke, D. (2008). Perception and appraisal of approaching motorcycles at junctions. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 11(3), 159-167.

Bibliographie

- Crundall, D., Crundall, E., Clarke, D., & Shahar, A. (2012). Why do car drivers fail to give way to motorcycles at t-junctions?. *Accident Analysis & Prevention*, 44(1), 88-96.
- Deffenbacher, J. L. (2008). Anger, aggression, and risky behavior on the road: A preliminary study of urban and rural differences. *Journal of Applied Social Psychology*, 38(1), 22-36.
- De Lucia, P. R. (1991). Pictorial and motion-based information for depth perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17, 738-748.
- De Lucia, P. R. (2013). Effects of size on collision perception and implications for perceptual theory and transportation safety. *Current Directions in Psychological Science*, 22, 199-204.
- De Lucia, P. R., & 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, 783-798.
- De Rugy, A., Taga, G., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2002). Perception-action coupling model for human locomotor pointing. *Biological cybernetics*, 87(2), 141-150.
- Dessing, J. C., Bullock, D., Peper, C. L. E., & Beek, P. J. (2002). Prospective control of manual interceptive actions: comparative simulations of extant and new model constructs. *Neural Networks*, 15(2), 163-179.
- Dewing, W., Duley, J., & Hancock, P. (1993). The role of vehicle type, velocity and gap size on driver left-turn decisions 37th annual meeting of the human factor society, Seattle, WA.
- Eberts, R. E., & MacMillan, A. G. (1985). Missperception of small cars. In R. E. Eberts, & C. G. Eberts (Eds.), *Trends in ergonomics/human factors II* (pp. 33-39) Amsterdam: NorthHolland.
- Espie, S., & 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, 7-16.
- Fajen, B. R. (2005). Perceiving possibilities for action: On the necessity of calibration and perceptual learning for the visual guidance of action. *Perception*, 34, 717-740.
- Fajen, B. R. (2007). Affordance-based control of visually guided action. *Ecological Psychology*, 19(4), 383-410.
- François, M., Morice, A. H. P., Blouin, J., & Montagne, G. (2011). Age-related decline in sensory processing for locomotion and interception. *Neuroscience*, 172, 366-378.
- Freydier, C., Berthelon, C., Bastien-Toniazzo, M., & Gineyt, G. (2014). Divided attention in young drivers under the influence of alcohol. *Journal of safety research*, 49, 13-e1.
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, 84, 279-325.
- Gibson, J. J. (1979). The ecological approach to visual. *Perception*.

Bibliographie

- Gibson, J. J. (1986). *The ecological approach to visual perception*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc. (Original work published in 1979).
- Glize, D., & Laurent, M. (1997). Controlling locomotion during the acceleration phase in sprinting and long jumping. *Journal of sports sciences*, 15(2), 181-189.
- Goodale, M. A., Milner, A. D., Jakobson, L. S., & Carey, D. P. (1991). Perceiving the world and grasping it. A neurological dissociation. *Nature*, 349, 154-156.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in neurosciences*, 15(1), 20-25.
- Goodale, M. A., Meenan, J. P., Bühlhoff, H. H., Nicolle, D. A., Murphy, K. J., & Racicot, C. I. (1994). Separate neural pathways for the visual analysis of object shape in perception and prehension. *Current Biology*, 4(7), 604-610.
- Gothié, M. (2000). The contribution to road safety of pavement surface characteristics. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (224).
- Gould, M., Poulter, D. R., Helman, S., & Wann, J. P. (2013). Detection of vehicle approach in the presence of additional motion and simulated observer motion at road junctions. *Journal of experimental psychology: applied*, 19(2), 171.
- Gray, R. (2004). The use and misuse of visual information for “go/no-go” decisions in driving. *contemporary issues in traffic research and road user safety*. Nova Science.
- Gray, R., & Regan, D. (2005). Perceptual processes used by drivers during overtaking in a driving simulator. *Human Factors*, 47, 394–417.
- Grechkin, T. Y., Chihak, B. J., Cremer, J. F., Kearney, J. K., & Plumert, J. M. (2013). Perceiving and acting on complex affordances: how children and adults bicycle across two lanes of opposing traffic. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 39(1), 23-36.
- Hancock, P. A., Caird, J. K., Shekhar, S., & Vercruyssen, M. (1991). Factors influencing drivers left turn decisions. *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* 35. (pp. 1139–1143).
- Hancock, P. A., & Manser, M. P. (1998). Time-to-contact. *Occupational injury: Risk prevention and intervention*, 44-58.
- Hay, J. G. (1988). Approach strategies in the long jump. *International Journal of Sport Biomechanics*, 4(2), 114-129.
- Heitmann, J. (2009). *The automobile and American life*. McFarland.
- Hesketh, B., & Godley, S. T. (2002). A comparison of time estimations in driving with target-only in motion, self-only in motion, and self-and-target in motion. *Ecological Psychology*, 14(3), 111-125.

Bibliographie

- Horswill, M. S., Helman, S., Ardiles, P., & Wann, J. P. (2005). Motorcycle accident risk could be inflated by a time to arrival illusion. *Optometry and Vision Science*, 82, 740–746.
- Houtenbos, M., de Winter, J. C. F., Hale, A. R., Wieringa, P. A., & Hagenzieker, M. P. (2017). Concurrent audio-visual feedback for supporting drivers at intersections: a study using two linked driving simulators. *Applied Ergonomics*, 30-42.
- Huet, M., Camachon, C., Fernandez, L., Jacobs, D. M., & 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.M., Camachon, C., Goulon, C., & Montagne. G. (2009). Self-controlled concurrent feedback facilitates the learning of the final approach phase in a fixed-base flight simulator. *Human factors*, 51, 858-871.
- Jeannerod, M., Decety, J., & Michel, F. (1994). Impairment of grasping movements following a bilateral posterior parietal lesion. *Neuropsychologia*, 32(4), 369-380.
- Jiang, X., Pang, Y., Li, X., & Pan, J. (2016). Speed up deep neural network based pedestrian detection by sharing features across multi-scale models. *Neurocomputing*, 185, 163-170.
- Johansson, G., & Backlund, F. (1970). Drivers and road signs. *Ergonomics*, 13(6), 749-759.
- Kaiser, M. K., & Mowafy, L. (1993). Optical specification of time-to-passage: observers' sensitivity to global tau. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(5), 1028-1040.
- Keay, L., Jasti, S., Munoz, B., Turano, K. A., Munro, C. A., Duncan, D. D., ... & West, S. K. (2009). Urban and rural differences in older drivers' failure to stop at stop signs. *Accident Analysis & Prevention*, 41(5), 995-1000.
- Knowles, W. B., & Carel, W. L. (1958). Estimating time-to-collision. 750 FIRST ST NE, WASHINGTON, DC 20002-4242: AMER PSYCHOLOGICAL ASSOC. In *American Psychologist*, 13 (7), 405-406.
- Larsen, L., & Kines, P. (2002). Multidisciplinary in-depth investigations of head-on and left-turn road collisions. *Accident Analysis & Prevention*, 34(3), 367-380.
- Larsson, A. F., Kircher, K., & Hultgren, J. A. (2014). Learning from experience: Familiarity with ACC and responding to a cut-in situation in automated driving. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 27, 229-237.
- Laurance, W. F., Clements, G. R., Sloan, S., O'connell, C. S., Mueller, N. D., Goosem, M., ... & Van Der Ree, R. (2014). A global strategy for road building. *Nature*, 513, 229-262.
- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5(4), 437-459.

Bibliographie

- Lee, D. N., Lishman, J. R., & Thomson, J. (1977). Visual guidance in the long jump. *Athletics Coach*, 11, 26-30.
- Lee, D. N., Lishman, J. R., & Thomson, J. A. (1982). Regulation of gait in long jumping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 448–458.
- Lee, D. N., Young, D. S., Reddish, P. E., Lough, S., & Clayton, T. M. H. (1983). Visual timing in hitting an accelerating ball. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35(2), 333-346.
- Lee, D. N., Young, D. S., & McLaughlin, C. M. (1984). A roadside simulation of road crossing for children. *Ergonomics*, 27(12), 1271-1281.
- Lenoir, M., Savelsbergh, G. J., Musch, E., Thiery, E., Uyttenhove, J., & Janssens, M. (1999). Intercepting moving objects during self-motion: Effects of environmental changes. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 70, 349–360.
- Louveton, N., Bootsma, R. J., Guerrin, P., Berthelon, C., & Montagne, G. (2012_a). Intersection crossing considered as intercepting a moving traffic gap: effects of task and environmental constraints. *Acta Psychologica*, 141, 287–294.
- Louveton, N., Montagne, G., Berthelon, C., & Bootsma, R. J. (2012_b). 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, 1500–1516.
- Louveton, N. (2012). *Le contrôle de l'interception d'un créneau en mouvement: Le cas de la traversée d'intersection* (Doctoral dissertation, Aix-Marseille Université).
- Louveton, N., Montagne, G., Bootsma, R. J., Berthelon, C. (soumis). Synchronising self-displacement with oncoming traffic gap: testing the constant bearing angle hypothesis against cross-traffic vehicles' size manipulations.
- Magil, R. (1993). Augmented feedback in skill acquisition. *Handbook of research on sport psychology*. New York. Mac Millan.
- Mann, D. L., Abernethy, B., & Farrow, D. (2010). Action specificity increases anticipatory performance and the expert advantage in natural interceptive tasks. *Acta Psychologica*, 135, 17–23.
- Manser, M. P., & Hancock, P. A. (1996). Influence of approach angle on estimates of time-to-contact. *Ecological Psychology*, 8(1), 71-99.
- Marti, G., Morice, A. H. P., & Montagne, G. (2015). Drivers' decision-making when attempting to cross an intersection results from choice between affordances. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9; 8:1026.
- Mathieu, J., Bootsma, R. J., Berthelon, C., & Montagne, G. (2017). Judging arrival times of incoming traffic vehicles is not a prerequisite for safely crossing an intersection:

- Differential effects of vehicle size and type in passive judgment and active driving tasks. *Acta Psychologica*, 173, 1–12.
- Mattel, M. S., & Meck, W. H. (2000). Neuropsychological mechanisms of interval timing behavior. *BioEssays*, 22, 94–103.
- McLeod, P., & Dienes, Z. (1993). Running to catch the ball. *Nature*, 362, 23
- McLeod, R. W., & Ross, H. E. (1983). Optic flow and cognitive factors in time-to-collision estimates. *Perception*, 12, 417–423.
- Milner, A. D., Perrett, D. I., Johnston, R. S., Benson, P. J., Jordan, T. R., Heeley, D. W., ... & Davidson, D. L. W. (1991). Perception and action in 'visual form agnosia'. *Brain*, 114(1), 405-428.
- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). Oxford psychology series, No. 27. The visual brain in action.
- Mohebbi, R., & Gray, R. (2007). Perceptual-motor control strategies for left-turn execution. *Driver Assessment 2007 Proceedings*, 502-508.
- Montagne, G., Laurent, M., Durey, A., & Bootsma, R. J. (1999). Movement reversals in ball-catching. *Experimental Brain Research*, 129, 87–92.
- Montagne, G., Cornus, S., Glize, D., Quaine, F., & Laurent, M. (2000). A 'perception-action coupling' type of control in long-jumping. *Journal of Motor Behavior*, 32, 37–44.
- Montagne, G. (2005). Prospective control in sport. *International Journal of Sport Psychology*, 36, 127–150.
- Morice, A. H. P., François, M., Jacobs, D. M., & Montagne, G. (2010). Environmental constraints modify the way an interceptive action is controlled. *Experimental brain research*, 202(2), 397-411.
- Morice, A. H. P., Diaz, G. J., Fajen, B. R., Babilio, N., & Montagne, G. (2015) An affordance-based approach to visually guided overtaking, *Ecological Psychology*, 27, 1–25.
- Morin, E. (1995). La stratégie de reliance pour l'intelligence de la complexité. *Revue internationale de systémique*, 9(2), 133-165.
- Navarro, J. (2017). Human-machine interaction theories and lane departure warnings. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 18(6), 519-547.
- Navarro, J., François, M., & Mars, F. (2016). Obstacle avoidance under automated steering: impact on driving and gaze behaviours. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 43, 315-324.
- Nikolas, M. A., Elmore, A. L., Franzen, L., O'neal, E., Kearney, J. K., & Plumert, J. M. (2016). Risky bicycling behavior among youth with and without attention-deficit hyperactivity disorder. *Journal of child psychology and psychiatry*, 57(2), 141-148.

Bibliographie

- Oudejans, R. R. D., Michaels, C. F., & van Dort, B. (1996). To cross or not to cross: The effect of locomotion on street-crossing behavior. *Ecological Psychology*, 8, 259–267.
- Page, Y. et Chauvel, C. (2004). Statistic accident analysis and definition of relevant scenarios. Rapport technique, LAB / PREVENT, Nanterre, Paris.
- Pavlov, I. P., & Anrep, G. V. (2003). *Conditioned reflexes*. Courier Corporation.
- Peden, M., *et al.* World report on road traffic injury prevention. 2004.
- Peper, L., Bootsma, R. J., Mestre, D. R., & 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. M., Kearney, J. K., & 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.
- Plumert, J. M., Kearney, J. K., & Cremer, J. F. (2007). Children's Road Crossing: A Window Into Perceptual–Motor Development. *Current Directions in Psychological Science*, 16(5), 255-258.
- Plumert, J. M., Kearney, J. K., Cremer, J. F., Recker, K. M., & 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. (2014). How Do Children Perceive and Act on Dynamic Affordances in Crossing Traffic-Filled Roads?. *Child development perspectives*, 8(4), 207-212.
- Poulton, E.C. (1957). On prediction in skilled movements. *Psychological Bulletin*, 54, 467-478.
- Purdy, W. C. (1958). The hypothesis of psychophysical correspondence in space perception PhD thesis, Cornell University, Ithaca, NY, USA.
- Rudin-Brown, C. M., & Parker, H. A. (2004). Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 7(2), 59-76.
- Saad, F., Delhomme, P., Van Elslande, P., Gauje, T., Nachtergaele, C., Picard-Dore, J., ... & GRATIA, G. (1992). Analyse des comportements en situation réelle de conduite: le franchissement d'intersections. *Rapport INRETS*, 158.
- Saad, F., & Villame, T. (1999). Intégration d'un nouveau système d'assistance dans l'activité des conducteurs d'automobile. *Sécurité et cognition, Hermès, Paris*, 105-114.
- Schiff, W. (1965). Perception of impending collision: A study of visually directed avoidant behavior. *Psychological Monographs: General and Applied*, 79(11), 1-26.

Bibliographie

- Schiff, W., & Detwiler, M. (1979). Information used in judging impending collisions. *Perception*, 8, 647–658.
- Schiff, W., & Oldak, R. (1990). Accuracy in judging time to arrival: Effect of modularity, trajectory and gender. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 303–316.
- Schmidt, R. A., & Debû, B. (1993). *Apprentissage moteur et performance* (p. 171). Paris: Vigot.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2005). Motor control and learning: A behavioral emphasis. Human Kinetics. Champaign : Human Kinetics.
- Scott, M. A., Li, F-X., & Davids, K. (1997). Expertise and the regulation of gait in the long jump approach phase. *Journal of Sport Sciences*, 15, 597–605.
- Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., & Wolf, P. (2013). Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: a review. *Psychonomic bulletin & review*, 20(1), 21-53.
- Simpson, G., Johnston, L., & Richardson, M. (2003). An investigation of road crossing in a virtual environment. *Accident Analysis & Prevention*, 35(5), 787-796.
- Skinner, B. F. (1938). *The behaviour of organisms: An experimental analysis*. D. Appleton-Century Company Incorporated.
- Stamatiadis, N., Taylor, W. C., & McKelvey, F. X. (1991). Older drivers and intersection traffic control devices. *Journal of Transportation Engineering*, 117(3), 311-319.
- Stanton, N. A., Young, M. S., Walker, G. H., Turner, H., & Randle, S. (2001). Automating the driver's control tasks. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5, 221-236.
- Stevenson, M. R., & Palamara, P. (2001). Behavioural factors as predictors of motor vehicle crashes: differentials between young urban and rural drivers. *Australian and New Zealand journal of public health*, 25(3), 245-249.
- Stoffregen, T. A., & Riccio, G. E. (1990). Responses to optical looming in the retinal center and periphery. *Ecological Psychology*, 2(3), 251-274.
- Sullivan, J. M., Flannagan, M. J., Pradhan, A. K., & Bao, S. (2016). Literature Review of Behavioral Adaptations to Advanced Driver Assistance Systems.
- Vagnoni, E., Lourenco, S. F., & Longo, M. R. (2012). Threat modulates perception of looming visual stimuli. *Current biology*, 22(19), R826-R827.
- Van der Kamp, J., Rivas, F., van Doorn, H., & Savelsbergh, G.J.P. (2007). Ventral and dorsal contributions in visual anticipation. *International Journal of Sport Psychology*.
- Van Loon, E. M., Khashawi, F., & Underwood, G. (2010). Visual strategies used for time-to-arrival judgments in driving. *Perception*, 39(9), 1216-1229.

Bibliographie

- Wann, J., & Land, M. (2000). Steering with or without the flow: is the retrieval of heading necessary?. *Trends in cognitive sciences*, 4(8), 319-324.
- Warren, W. H. (1984). Perceiving affordances: visual guidance of stair climbing. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 10(5), 683-703.
- Warren, W. H., Young, D. S., & Lee, D. N. (1986). Visual control of step length during running over irregular terrain. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12, 259–266.
- Warren, W. H. (1988). Action mode and laws of control for the visual guidance of action. In O. Meijer & K. Roth (Eds.), *Complex movement behavior: 'the' motor-action controversy* (pp. 339–380). Amsterdam: North-Holland.
- Warren, W. H., Kay, B. A., Zosh, W. D., Duchon, A. P., & Sahuc, S. (2001). Optic flow is used to control human walking. *Nature Neuroscience*, 4, 213–216.
- Warren, W.H. (2006) The dynamics of perception and action. *Psychological Review*, 113, 358-389.
- Watson, J. B. (1958). *Behaviorism*. Transaction Publishers.
- Wraga, M., Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (2000). Perception-action dissociations of a walkable Müller-Lyer configuration. *Psychological Science*, 11(3), 239-243.

Table des Figures

Table des figures

1. 1 : Facteurs susceptibles d'être à l'origine de l'occurrence d'un accident.....	13
1. 2 : Les différents types de manœuvres réalisables en intersection	16
1. 3 : Jugement du temps d'arrivée d'un objet en fonction du temps d'arrivée réel.....	20
1. 4 : Jugement et pourcentage de précision du temps d'arrivée d'un véhicule	22
1. 5 : Estimation et prise de décision réelle pour effectuer une manœuvre de dépassement.....	33
2. 1 : Système agent-environnement en conduite automobile	41
2. 2 : Couplage perception-action	43
2. 3 : Cycle information-mouvement.	45
2. 4 : Evolution de l'angle de relèvement au cours de la phase d'approche	48
2. 5 : Evolution de la variabilité inter-essais des variables de contrôle et d'ajustement.....	52
2. 6 : Contrôle en forme d'entonnoir	53
2. 7 : Système visuel selon Goodale et Milner.	55
2. 8 : Illusion de Müller-Lyer	56
2. 9 : Illusion de Müller-Lyer en fonction de la tâche à réaliser.....	57
2. 10 : Environnement routier lors d'une traversée d'intersection.	60
2. 11 : Vitesse et déviation courante des participants lors de la phase d'approche	63
2. 12 : Fenêtres inter-véhiculaires synchrones et asynchrones lors de la traversée.	65
2. 13 : Différentes géométries d'intersection	68
3. 1 : Illustration du dispositif expérimental.....	87
3. 2 : Jugement du temps d'arrivée moyen du véhicule observé	91
3. 3 : Erreur constante, absolue et variable du jugement du temps d'arrivée	94
3. 4 : Illustration de la scène visuelle	101
3. 5 : Position de traversée moyenne au sein de la fenêtre inter-véhiculaire.....	104
3. 6 : Vitesse moyenne adoptée par les participants au cours de la phase d'approche.....	106
3. 7 : Déviation courante des participants au cours de la phase d'approche.....	110
4. 1 : Tolérance temporelle en fonction du temps et des capacités d'accélération	129
4. 2 : Illustration du dispositif expérimental.....	132
4. 3 : Particularités de la phase de familiarisation	134
4. 4 : Performances possibles en fonction des capacités d'accélération du véhicule	139
4. 5 : Illustrations du comportement de régulation produit à la fin de la phase d'étalonnage	143
4. 6 : Lieu de traversée de l'intersection au sein de la fenêtre inter-véhiculaire	146
4. 7 : Vitesse et déviation courante des participants en fonction du temps disponible.	147
4. 8 : Vitesse adoptée par les participants en fonction des variables manipulées	150
4. 9 : Déviation courante en fonction de l'offset et de la capacité d'accélération	151
4. 10 : Variabilité de la vitesse en fonction de l'offset et des capacités d'accélération	153
4. 11 : Variabilité de la déviation courante en fonction des variables manipulées.	155

Intersection crossing and collision avoidance in driving

Identification of perceptual substrate and markers of an information-movement coupling

Abstract

This Ph.D. project aims at studying the perceptual-motor mechanisms implicated in intersection crossing task. The first part of this manuscript explains the human, economic and societal challenges associated with the successfully complete the intersection crossing task. The main results of the former studies that have examined the identification of risks associated with this type of maneuver at an intersection are developed. These former studies mainly focused on high-level processes (e.g., discrete judgment or decision tasks), we have decided to focus our attention on low-level processes (e.g., visual guidance) during this Ph.D. project. For this to happen, the Ecological Approach to Perception and Action seems to be a relevant theoretical framework for studying this complex task. Indeed, it preserves the natural link between information and movement. The second part of this manuscript is devoted to the experiments completed during this research. In order to carry out our three experiments, virtual reality fixed-base driving simulator was used. This work contributes to better understand the perceptual substrate involved in intersection crossing task. Also, this work identifies different markers of control based on information-movement coupling. Firstly, our results revealed that the perceptual substrate underlying judgments of arrival time of a vehicle moving towards an intersection is distinct from the perceptual substrate underlying the active control of one's own approach to the same intersection. Secondly, the results have also strengthened the assumption that the control of approach and intersection crossing task is based on information-movement coupling. To conclude, the last part proposes perspectives on applied research. This perspectives focus on the designing adaptive driver assistance systems (ADAS) of new generation.

Keywords: intersection crossing, information-movement coupling, functional regulation, perceptual-motor mechanism, driving simulator.

Traversée d'intersection et évitement de collision en conduite automobile

Identification du support perceptif et des marqueurs du couplage information-mouvement

Résumé

L'objectif principal de ce travail de thèse était d'étudier les mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent la réalisation d'une tâche d'approche et de traversée d'intersection en conduite automobile. Dans la première partie de ce manuscrit les enjeux humains, économiques et sociétaux liés à la réussite d'une telle tâche sont évoqués. Les principaux résultats obtenus dans les études ayant porté sur l'identification des risques associés à la réalisation de ce type de manœuvre sont présentés. La plupart des travaux réalisés s'étant focalisés sur les processus de haut niveau (e.g., jugement d'un temps d'arrivée), nous avons souhaité durant cette thèse centrer notre attention sur les processus de bas-niveau mis en œuvre. Ce travail de thèse est adossé à l'approche Ecologique de la Perception et de l'Action qui nous a semblé proposer un cadre théorique pertinent pour étudier cette tâche complexe. La deuxième partie est consacrée aux expériences réalisées au cours de ce travail de thèse. Pour réaliser nos trois expériences, un simulateur de conduite à base fixe a été utilisé. Ce travail a permis (i) d'acquérir une meilleure compréhension du support perceptif impliqué dans la réalisation d'une tâche de traversée d'intersection et (ii) d'identifier différents marqueurs du couplage information-mouvement. Les résultats ont révélé que le support perceptif utilisé pour réaliser une tâche perceptive (e.g., jugement d'un temps d'arrivée) n'était pas le même que celui utilisé pour réaliser une tâche perceptivo-motrice (e.g., approche et traversée d'une intersection). Les résultats ont également permis d'étayer la thèse selon laquelle le contrôle de la tâche d'approche et de traversée d'intersection reposerait sur un couplage information-mouvement. En guise de conclusion des perspectives de recherche appliquées sont proposées. Elles portent essentiellement sur la conception de systèmes d'assistance à la conduite (ADAS) de nouvelle génération.

Mots clés : traversée d'intersection, couplage information-mouvement, régulation fonctionnelle, mécanismes perceptivo-moteurs, simulateur de conduite.

