

Prise de Décision et Possibilités d'action : La théorie des affordances à l'épreuve du dépassement automobile

Numa Basilio

▶ **To cite this version:**

Numa Basilio. Prise de Décision et Possibilités d'action : La théorie des affordances à l'épreuve du dépassement automobile. Neurosciences. Aix-Marseille Université (AMU), 2015. Français. NNT : . tel-02009826

HAL Id: tel-02009826
https://amu.hal.science/tel-02009826

Submitted on 6 Feb 2019

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.

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ
FACULTÉ DES SCIENCES DU SPORT DE LUMINY
163, avenue de Luminy
13288 Marseille CEDEX 09
FRANCE

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Sciences du Mouvement Humain

présentée par

NUMA BASILIO

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

PRISE DE DÉCISION ET POSSIBILITÉS D'ACTION :
LA THÉORIE DES *AFFORDANCES* À L'ÉPREUVE DU DÉPASSEMENT AUTOMOBILE

Soutenue le 03 Juillet 2015 devant un jury composé de :

J. J. TEMPRADO	PR. Aix-Marseille Université	ISM	Marseille	Président du jury
C. BERTHELON	DR. IFSTTAR	LMA	Salon-de-Provence	Rapporteur
J. BASTIN	MCF-HDR. Université Joseph Fourier	GIN	Grenoble	Rapporteur
J. NAVARRO	MCF. Université Lumière Lyon 2	EMC	Lyon	Examinateur
A. MORICE	MCF. Aix-Marseille Université	ISM	Marseille	Directeur de thèse
G. MONTAGNE	PR. Aix-Marseille Université	ISM	Marseille	Directeur de thèse

École Doctorale des Sciences du Mouvement Humain – ED 463
UMR 7287 Institut des Sciences du Mouvement Étienne-Jules Marey

À mon frère Rémi.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de thèse, Gilles MONTAGNE et Antoine MORICE de m'avoir donné l'opportunité de prendre à bras le corps cette problématique du comportement humain à travers l'approche écologique. Merci également pour leur soutien, leur aide et leurs conseils dans les moments plus difficiles. Merci pour leurs nombreuses relectures d'articles, de posters, et pour tous leurs commentaires, en particulier concernant ce manuscrit de thèse. Merci à Cécile MARTHA pour sa collaboration scientifique et son expertise dans les conduites à risque.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury, Catherine BERTHELON, Julien BASTIN, Jordan NAVARRO et Jean-Jacques TEMPRADO pour avoir accepté d'expertiser mon travail de thèse et pour le temps qu'ils ont consacré à sa lecture. Merci de l'intérêt que vous avez porté à ce travail.

Je voudrais également remercier tous ceux sans qui cette thèse n'aurait pu se dérouler dans de si bonnes conditions. À tous mes compagnons de thèse : Vincent PERTICI, Jonathan ENTAKLI qui ont su donner tant de légèreté à nos réflexions quotidiennes. Merci pour leur humour et leur joie de vivre qui ont rendu ces moments plus agréables. Une pensée à ceux qui m'ont précédé : Nicolas, Hugo, Mickaël, Colas, Cécile et Aurore. Merci pour les nombreuses pauses et discussions scientifiques que nous avons pu partager ensemble. Merci à mes vieux amis pour leur soutien constant : François, Christophe, Terry, Julien et Vincent. Un merci tout particulier à mon plus proche camarade, Geoffrey, avec qui j'ai partagé tant de hauts et de bas durant cette thèse, avec qui je me suis heurté à l'insaisissable cadre écologique. Sans lui, cette thèse n'aurait pas eu la même saveur.

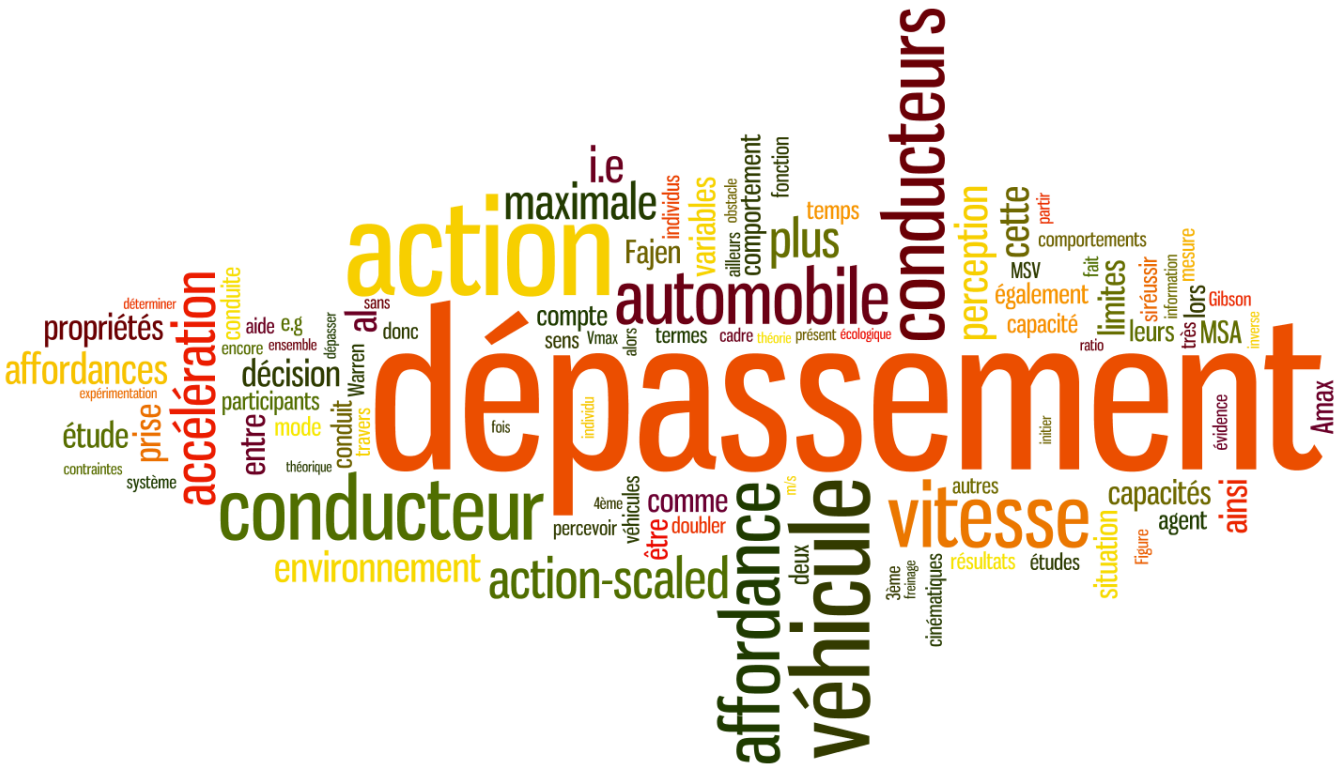
Merci également au soutien administratif de l'École Doctorale. Mireille MEOZZI, ancienne secrétaire de l'École Doctorale SMH, merci pour ses années d'implication et de soutien. Merci à Nathalie ROUSTAN pour avoir si bien repris le flambeau et pour avoir été aussi disponible durant cette thèse. Merci enfin au directeur de l'École Doctorale, Reinoud BOOTSMA, pour son écoute et son travail quotidien auprès des doctorants.

Cette thèse a été réalisée à l'Institut des Sciences du Mouvement et je tiens donc à remercier son directeur, Éric BERTON, ainsi que toutes les personnes qui nous ont permis d'y travailler dans de très bonnes conditions : Nathalie FENOUIL, Bernadette BESSON, Sylvain FLOUCAT, Cédric GOULON et Jean-Pierre GRIMALDI. Je voudrais également remercier les personnes qui ont gracieusement donné de leur temps pour participer à mes expériences.

Je souhaiterais aussi remercier ma famille, merci à mes parents et beaux-parents pour avoir été présents durant toute la durée de cette thèse. Merci pour leur soutien sans faille.

Un immense merci et une éternelle reconnaissance à ma future femme, Audrey. Je la remercie pour son soutien, son aide si précieuse, son intelligence et sa joie de vivre au quotidien qui m'ont permis d'aller au bout de cette aventure. Sans elle, je n'en serai pas arrivé jusque-là.

Enfin, une pensée toute particulière à mon frère Rémi.



Nuage de mots réalisé à l'aide de [Wordle](). La taille des mots est fonction de leurs fréquences d'apparition dans le manuscrit.

TABLES DES MATIÈRES

I. Introduction 1

I.1 Cadre général : le dépassement automobile 4

I.1.1 Le dépassement automobile : une activité perceptivo-motrice complexe 4

I.1.1.1 Un rapport accidentologique éloquent 5

I.1.1.2 Une accidentologie aux causes diverses et variées 6

I.1.2 Le dépassement automobile : un mode d'action, de multiples approches 8

I.1.2.1 L'enjeu des propriétés environnementales du dépassement 9

I.1.2.2 L'enjeu des propriétés du conducteur 11

I.1.2.3 Prise en compte des propriétés du couple conducteur-environnement 14

I.2 Contexte théorique : l'*affordance* à l'épreuve du comportement 17

I.2.1 Le concept d'*affordance* : entre théorie et application 17

I.2.1.1 Le parti pris de J. J. Gibson : Conceptualisation et formalisation de l'affordance 18

I.2.1.1.1 Comment définir l'affordance ? 20

I.2.1.1.2 Affordances et mécanismes perceptivo-moteurs 23

I.2.1.2 « Attrapabilité », « franchissabilité », « freinabilité »…l'enjeu des affordances 26

I.2.1.2.1 Prise de décision et affordances dimensionnées aux propriétés anthropométriques 27

I.2.1.2.2 Prise de décision et affordance dimensionnée à l'action 32

I.2.1.2.3 Prise de décision et régulation de l'action : l'enjeu de l'affordance dimensionnée à l'action 40

I.2.2 Le dépassement automobile : analyse des mécanismes perceptivo-moteurs à travers le prisme écologique 46

I.2.2.1 Dépassement et affordance MSV/Vmax 47

I.2.2.2 Dépassement et affordances MSV/Vmax et MSA/Amax 50

I.2.2.3 Dépassement et affordance MSA/Amax 3ème et MSA/Amax 4ème 53

I.2.3 Problématique et objectifs 57

II. Méthodologie générale 62

II.1 Le simulateur de conduite : une validité écologique expérimentale 62

II.1.1 La réalité virtuelle 62

II.1.2 Le simulateur de conduite 63

II.2 Configuration environnementale et propriétés d'intérêt 65
II.2.1 La situation de dépassement automobile 65
II.2.2 Les propriétés d'intérêt du conducteur 66
II.3 Acquisition et analyse des données expérimentales 67
II.3.1 Acquisition des données expérimentales 67
II.3.2 Analyse des données expérimentales 68
III. Chapitres Expérimentaux 70
III.1 Prise de décision et *affordance MSV/Vmax* 70
III.1.1 Résumé de l'expérimentation 1 70
III.1.2 Manuscrit de l'expérimentation 1 73
III.2 Influence respective des *affordances MSV/Vmax* et *MSA/Amax* sur la prise de décision 103
III.2.1 Résumé de l'expérimentation 2 103
III.2.2 Manuscrit de l'expérimentation 2 106
III.3 Prise de décision et régulation de l'action : l'enjeu de l'*affordance MSA/Amax* ... 131
III.3.1 Résumé de l'expérimentation 3 131
III.3.2 Manuscrit de l'expérimentation 3 134
IV. Discussion générale 157
IV.1 Contributions théoriques 157
IV.1.1 La théorie des *affordances* appliquée au dépassement automobile 157
IV.1.1.1 Rappels et apports théoriques des principaux résultats : 157
IV.1.1.2 Un regard théorique probabiliste du dépassement automobile 166
IV.1.2 Formalisation d'une *affordance* dimensionnée à l'action : limites et perspectives 170
IV.1.2.1.1 Affordance et réalisme du dépassement automobile : quelles limites ? 170
IV.1.2.1.2 Les invariants optiques du dépassement automobile 173
IV.1.3 Personnalité et théorie des *affordances* : quelles articulations ? 177
IV.1.3.1 Exploitation des affordances et traits de personnalité, deux réalités interdépendantes ? 177
IV.1.3.2 Au-delà des limites conceptuelles écologiques : vers une nouvelle formalisation de la subjectivité/objectivité de la perception 179
IV.2 Perspectives : vers quelles applications ? 185
IV.2.1 Formation et apprentissage des jeunes conducteurs dans des situations à fortes contraintes spatio-temporelles 185

IV.2.2 Pour un système d'aide au dépassement personnalisé 187
V. Bibliographie 191
VI. Index 219

AVANT-PROPOS

Ce travail de thèse a fait l'objet de trois articles dont 2 publiés dans des revues internationales indexées ISI et un article en préparation. Ces articles, rédigés en anglais, sont présentés dans les Chapitres Expérimentaux (cf. respectivement pp. 73, 106 et 134)

Article 1. Antoine H. P. Morice, Gabriel J. Diaz, Brett R. Fajen, **Numa Basilio** & Gilles Montagne (2015). An Affordance-Based Approach to Visually Guided Overtaking, Ecological Psychology, 27:1, 1-25, DOI: 10.1080/10407413.2015.991641

Article 2. **Numa Basilio**, Antoine H. P. Morice, Geoffrey Marti & Gilles Montagne (sous presse). High- and low- order overtaking-ability affordances: Drivers rely on the maximum velocity and acceleration of their cars to perform overtaking maneuvers. Human Factors, DOI: 10.1177/0018720815583581

Article 3. **Numa Basilio**, Antoine H. P. Morice & Gilles Montagne (*in preparation*). Driver's ability to use gearbox when performing overtaking maneuvers.

"*Ask not what's inside your head, but what your head is inside of" (Mace, 1977)*

I. Introduction

Se mouvoir et percevoir, véritable point de départ de l'évolution animale, sont deux actes fondamentaux dans l'interaction entre un agent – organisme vivant du règne animal ou robot – et son environnement. Tout au long de son évolution, l'agent, en se mouvant et en percevant, a su s'adapter aux différentes contraintes environnementales en façonnant son milieu i.e., sa niche écologique (J. J. Gibson 1986), et en étant lui-même façonné par l'environnement (Merleau-Ponty 1976). La perception, par essence active, est considérée comme un acte comme l'indique l'étymologie du terme « *percipere* », « se saisir de », littéralement « prendre à travers ». Percevoir n'est donc pas recevoir mais avant tout capter, prendre pour soi, s'emparer de (Luyat 2009).

Cette réciprocité ou mutualité entre l'agent et l'environnement (J. J. Gibson 1986) a permis le développement de mécanismes perceptivo-moteurs pertinents, adaptés à l'environnement, indispensables à l'exploitation optimale des ressources présentes dans sa niche écologique, mais également indispensables à la perception du caractère dangereux d'une interaction (E. J. Gibson and Walk 1960; Withagen and Chemero 2009; Withagen and van Wermeskerken 2010). Pour la survie de l'espèce humaine par exemple, il était vital pour l'Homme préhistorique de percevoir ce qui pouvait ou non le mettre en danger de mort dans son interaction avec l'environnement. Plus particulièrement, à mesure que l'Homme avançait dans son évolution, l'interaction étroite avec l'environnement s'est faite par le biais d'une sophistication des outils (*Homo habilis* : entre 2.5 et 1.8 millions d'années) et des « *media* » utilisés lors de ses activités (e.g., chasse, recherche de nourriture etc.).

L'utilisation optimale de ces différents outils a nécessité la mise en place de nouveaux mécanismes de guidage perceptivo-moteurs qui sous-tendent l'interception d'une proie ou d'un objet par exemple. Plusieurs théories, que l'on pourrait qualifier de monistes et d'externalistes (Darras & Belkhamsa, 2008), parmi lesquelles la théorie écologique de la perception et de l'action (J. J. Gibson, 1986), postulent que l'Homme contemporain aurait hérité de systèmes perceptifs très aboutis dotés d'une double fonction : exploratoire et perceptive (Luyat & Regia-Corte, 2009). Par exemple, le système visuel possède une fonction exploratoire grâce aux mouvements de l'œil (rendus possibles par les muscles extra-oculaires) et une fonction perceptive : la vision en tant que telle. Ces systèmes perceptifs ainsi définis rendent possible la mise en place de mécanismes perceptivo-moteurs, fruits de plusieurs

millions d'années d'évolution (J. J. Gibson, 1986; Withagen & Chemero, 2009; Withagen & van Wermeskerken, 2010). La théorie gibsonienne postule en ce sens que toute perception est directe, autrement dit directement porteuse de sens et de propriétés exploitables. Il convient, dès lors, d'identifier les propriétés d'intérêt et de formaliser les mécanismes perceptivo-moteurs qui permettent à l'Homme de réussir, au quotidien, des actions entreprises à l'aide de nouveaux outils de locomotion très récemment élaborés (e.g., l'automobile).

Depuis les années 1915 et la démocratisation progressive de la conduite automobile – notamment aux États-Unis dont la production automobile atteignait près d'un million de véhicules[1]– les chercheurs (Stoeckel, May & Kirby, 1936) se sont interrogés sur ce nouvel outil élaboré et utilisé par l'Homme. Un des premiers constats établis par les scientifiques présentait la conduite automobile comme l'une des tâches les plus importantes pour un individu, puisque la moindre défaillance du véhicule et/ou du conducteur pouvait lui être fatale. De nombreux questionnements relatifs à la nature et à l'acquisition des compétences automobiles ont ainsi progressivement émergé chez les scientifiques. Selon quelles modalités les conducteurs prennent-ils en compte l'ensemble des possibilités offertes par cet outil mécanique ? Sur quels éléments portent-ils leur attention ? Lesquels sont primordiaux pour les conducteurs ?

Ainsi est-il devenu indispensable d'étudier plus précisément cette nouvelle activité perceptivo-motrice mettant en jeu des interactions entre l' « Homme-outil » - l'outil étant le prolongement de l'Homme – et son environnement dans une échelle de temps inhabituellement courte (Groeger, 1999). Malgré ce constat, rares sont les chercheurs à s'être penchés sur l'aspect holistique de cette activité, mettant en jeu à la fois l'Homme-outil et l'environnement. Jusqu'à présent, aucune étude référencée ne s'est intéressée à une compréhension du dépassement automobile intégrant les contraintes environnementales et individuelles (e.g., puissance du véhicule conduit, etc.) à travers le cadre de la théorie écologique de la perception et de l'action.

Dès lors, tout l'enjeu de ma thèse sera d'identifier les propriétés d'intérêt et de comprendre les mécanismes perceptivo-moteurs de la prise de décision – et, dans une moindre mesure, de la régulation de l'action – à l'origine d'une manœuvre pratiquée par plusieurs centaines de millions d'individus à travers le monde : le dépassement automobile.

[1] Freyssenet M., La production automobile mondiale, des quatre continents et des principaux pays constructeurs, 1898-2012.

Dans cette perspective, j'aborderai tout d'abord (I) les différents enjeux d'une étude portant sur la conduite automobile et plus précisément sur la problématique du dépassement. Il s'agira dans un premier temps d'aborder le bilan éloquent des statistiques accidentologiques à travers différents facteurs (I.1).

Dans un deuxième temps, j'aborderai le cadre général du dépassement automobile en dressant un aperçu des recherches sur le dépassement et en pointant leurs limites. J'envisagerai ensuite la nécessité d'étudier ce type de tâche perceptivo-motrice dans le cadre théorique des *affordances* (I.2). Enfin, je présenterai la méthodologie expérimentale utilisée dans chacune de mes expérimentations qui s'appuie sur la réalité virtuelle et ses multiples avantages pour l'étude des comportements de dépassement automobile (II).

La troisième partie du manuscrit sera consacrée aux trois expérimentations réalisées lors de ce projet doctoral (III). Pour plus de clarté, un résumé de ces expérimentations figurera au début de chaque article.

La quatrième partie de ce document portera sur la discussion des résultats obtenus (IV), en mettant en évidence ma contribution à la théorie des affordances (IV.1). Je présenterai notamment une quatrième et dernière expérimentation qui aura trait à l'étude des profils de personnalités des conducteurs (IV.1.3). J'aborderai pour finir les possibles applications de cette recherche dans la vie quotidienne, telles que les campagnes de prévention destinées aux conducteurs ou encore l'assistance personnalisée au dépassement.

L'objectif de cette thèse est ainsi d'utiliser le cadre conceptuel des *affordances* (J. J. Gibson, 1986), très peu exploité jusqu'à présent dans le domaine de la conduite automobile, pour comprendre les processus de prise de décision et, dans une moindre mesure, de régulation de l'action. Pour ce faire, nous nous proposons d'identifier les propriétés pertinentes du système agent-environnement ainsi que ceux de l'agent et de formaliser les « stratégies » perceptivo-motrices sous-jacentes à la prise de décision et à la régulation du dépassement.

I.1 Cadre général : le dépassement automobile

I.1.1 Le dépassement automobile : une activité perceptivo-motrice complexe

Le dépassement automobile est une activité perceptivo-motrice complexe à fortes contraintes spatio-temporelles. Elle nécessite une attention soutenue (Lemercier & Cellier, 2008) et des comportements à chaque instant appropriés aux contraintes de la situation dans un délai temporel très court. Dans un ouvrage de vulgarisation, le journaliste scientifique Vanderbilt (2009) résume la situation du conducteur en affirmant qu'«à part peut-être la neurochirurgie, la conduite automobile représente sans doute l'activité la plus complexe[2]».

D'après McKnight et Adams (1970) et Schäfer (2009), pour conduire une voiture, il faut réaliser environ 40 tâches majeures et 1 700 sous-tâches (e.g., tenue du volant, changement de vitesse, etc.). En partant du postulat qu'il faut traiter deux stimuli par mètre parcouru, un conducteur automobile parcourant 1.5 kilomètres à 90 kilomètres par heure devrait traiter 3000 stimuli par minute[3]. Par ailleurs, la difficulté d'une manœuvre de dépassement se trouve davantage augmentée lorsque le conducteur est contraint d'utiliser un véhicule inhabituel. Il doit alors s'adapter aux nouvelles caractéristiques physiques de son véhicule (e.g., puissance, hauteur du véhicule, etc.) de manière à percevoir précisément les contraintes cinématiques de son environnement (e.g., vitesse des véhicules environnant, etc). Toutefois, malgré la complexité évidente d'une manœuvre de dépassement automobile, une majorité d'automobilistes réussit ce type de tâche quotidiennement.

Selon plusieurs auteurs (Morice, Diaz, Fajen, Basilio, & Montagne, 2015; Naranjo, Gonzalez, Garcia, & de Pedro, 2008), le dépassement automobile peut être décrit à travers cinq phases (Figure 1 – dans cette configuration, les conducteurs sont supposés rouler à droite). Le processus commence avec la phase de départ (*Start phase*, Figure 1A), durant laquelle le conducteur met en œuvre des actions destinées à l'aider dans sa décision d'initier une manœuvre de dépassement à la fois légale et prudente. C'est par exemple le cas des légers déplacements latéraux dans la voie opposée afin d'améliorer la vision du trafic venant en sens inverse. Si le conducteur juge que les conditions sont assez sûres pour commencer une

[2] « *For those of us who aren't brain surgeons, driving is probably the most complex everyday thing we do*», Vanderbilt (2009, p.39).
[3] Il m'a semblé opportun de mentionner cette étude, mais il faut cependant rester prudent quant à la validité scientifique de tels résultats.

manœuvre de dépassement, ce dernier pourra alors initier un déplacement latéral total dans la voie opposée (*Left phase*, Figure 1B*)* tout en accélérant pour doubler le véhicule-leader (*Pass phase*, Figure 1C*)*. Une fois que le conducteur a visuellement vérifié que le dépassement est complet, autrement dit que le véhicule leader se trouve derrière lui, il doit retourner sur sa voie initiale, tout en évitant le véhicule obstacle immobilisé, (*Right phase*, Figure 1D) pour enfin terminer la manœuvre de dépassement (*End phase*, Figure 1E).

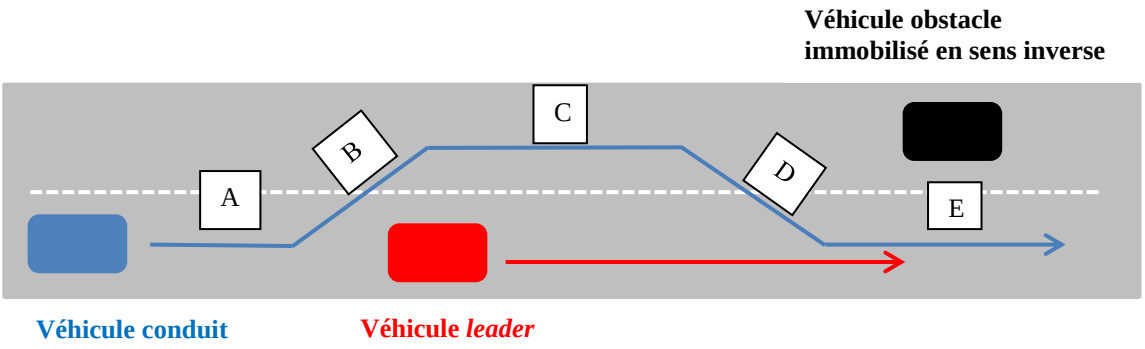


Figure 1 : Représentation schématique d'une situation de dépassement automobile classique : initiation du déplacement latéral dans la voie opposée (*Left phase,* B) ; accélération pour doubler le véhicule-leader (*Pass phase,* C) ; retour du conducteur sur sa voie initiale (*Right phase,* D) pour enfin terminer la manœuvre de dépassement (*End phase,* E)

Bien que très peu étudié par les chercheurs jusqu'alors, le dépassement automobile présente des intérêts et enjeux majeurs dans la compréhension du comportement du conducteur ancré dans son environnement.

I.1.1.1 Un rapport accidentologique éloquent

Des études relatives à l'accidentologie routière française indiquent que les accidents et la gravité de leurs conséquences s'expliquent par une combinaison de facteurs liés au conducteur, au véhicule, à la route, aux conditions de circulation, ou encore aux secours (Association Prévention Routière (APR), n.d.). Clarke, Ward, et Jones (1999) ont mis en évidence la complexité du dépassement qui peut échouer dans de nombreux cas : 8% d'accidents sont liés aux dépassements automobiles. Des erreurs dans le jugement de la distance requise pour réaliser la manœuvre ou encore la mauvaise perception de la vitesse du véhicule leader (ou possiblement l'accélération de son véhicule) peuvent être les causes de

l'échec d'un dépassement automobile (Clarke, Ward, & Jones, 1998). De récentes études (Cantin, Lavalliere, Simoneau, & Teasdale, 2009; McKnight & Adams, 1970; Polus, Livneh, & Frischer, 2000) ont confirmé les observations initiales de Clarke et al. (1999).

Par ailleurs, d'après le bilan de l'accidentalité routière de l'année 2012 (Sécurité Routière, n.d.), 49.1% des victimes de la route le sont lors d'une collision entre au moins deux véhicules, dont la moitié en collision frontale, généralement au cours d'un dépassement. Plus précisément, les accidents sur route dus à un dépassement dangereux revêtent plusieurs formes (40 millions d'automobilistes, n.d.) : la collision frontale avec un véhicule arrivant en face, la perte de contrôle en touchant l'accotement gauche de la chaussée, la perte de contrôle en se rabattant après avoir doublé, la collision avec le véhicule doublé. Les accidents routiers survenus durant un dépassement automobile sont fonction du trafic et de la période de la journée : 75% d'entre eux se produisent de jour. Autre statistique très intéressante, la responsabilité d'un accident suite à un dépassement dangereux se répartit entre 30% pour les deux roues sans spécificité d'âge et 70% pour les autres véhicules avec une concentration à 88% pour les conducteurs âgés de moins de 45 ans. Ces statistiques mettent en évidence la nécessité d'étudier d'une part le dépassement automobile réalisé par certains types de véhicules (en dehors des deux roues) et d'autre part une population de conducteurs relativement jeunes.

I.1.1.2 Une accidentologie aux causes diverses et variées

Les jeunes conducteurs de 18 à 24 ans ont un risque quatre fois supérieur à l'ensemble des conducteurs (Sécurité Routière, n.d.) d'être tué sur la route. En 2012, cette classe d'âge a connu une mortalité élevée : 20.6 % de la mortalité pour 8.8 % de la population, à tel point que la mortalité routière est devenue la principale cause de décès chez les jeunes adultes. Comme ont pu également le confirmer d'autres études (Cantin et al., 2009; Clarke et al., 1998; Farah, 2011; Llorca, Garcia, Zuriaga, Maria, & Moreno, 2012; Matthews et al., 1998; Mohaymany, Kashani, & Ranjbari, 2010a; Özkan & Lajunen, 2006; Zhang, Owen, & Clark, 1998), la population des jeunes conducteurs est représentée dans les statistiques accidentologiques du fait, notamment, de leur inexpérience au volant et de leur plus grande propension à la prise de risque (Sécurité Routière, n.d.). Par ailleurs, d'après le dernier rapport

de la sécurité routière 2012, le niveau de responsabilité des jeunes conducteurs (18-24 ans) impliqués dans les accidents mortels est supérieur à celui de l'ensemble des classes d'âges (respectivement 68 % contre 57 %). Il s'explique en grande partie par la présence d'alcool dans le sang des conducteurs.

En outre, un dernier point est à considérer dans les statistiques de l'accidentologie routière : les routes nationales à deux voies de circulation occupent un espace important dans la plupart des réseaux routiers du monde. Environ 60% de tous les accidents dans les États membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) se produisent sur ce type de route[4] ; 35 à 50% des morts sont directement reliés aux manœuvres de dépassement[5].

Comprendre l'activité de dépassement nécessite dès lors de déterminer les propriétés du système agent-environnement susceptibles d'être prises en compte, par le conducteur, dans la réalisation d'une telle manœuvre. L'identification et la formalisation des propriétés en jeu permettraient ainsi de caractériser les processus perceptifs et moteurs sous-jacents au dépassement. Par ailleurs, compte tenu du bilan accidentologique, une étude doit être menée sur une population relativement jeune dans un contexte de routes nationales à deux voies de circulation.

Dans la partie suivante, nous présenterons à travers plusieurs études un aperçu des propriétés d'intérêt – qu'elles soient liées à l'environnement routier et/ou au conducteur – susceptibles d'influencer la prise de décision et la réalisation d'un dépassement automobile. Nous discuterons par la suite les limites de telles études et proposerons un nouvel éclairage conceptuel en montrant comment, en s'opposant au dualisme de la perception et de l'action, la théorie écologique offre un cadre explicatif pertinent à l'étude du dépassement automobile.

[4] *Safety Strategies for Rural Roads.* Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1999.

[5] *CARE: Project Community Road Accident Database, 1993–2003.* Council Decision 93/704/EC, OJ L 329, 30.12.1993, pp. 63–65.

RÉSUMÉ :

- De nombreuses études scientifiques ont mis en évidence la complexité du dépassement automobile (Cantin et al., 2009; McKnight & Adams, 1970; Polus et al., 2000).
- Les données accidentologiques révèlent une fréquence de collision non négligeable lors du dépassement automobile (Clarke et al., 1998).
- Environ 60% des accidents survenus dans les États membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) se produisent sur les routes nationales à deux voies de circulation.
- Une population est particulièrement à risque : les jeunes conducteurs de 18 à 24 ans dont le risque d'être tués sur la route est quatre fois supérieur à celui de l'ensemble des conducteurs.

I.1.2 Le dépassement automobile : un mode d'action, de multiples approches

Tout d'abord, il convient de rappeler les nombreuses contraintes spatio-temporelles auxquelles est soumis l'ensemble des 5 phases de dépassement (cf. pp. 6-7). En effet, l'échelle de temps d'un dépassement automobile n'excède que très rarement une dizaine de secondes (Hegeman, Brookhuis, & Hoogendoorn, 2005). Ainsi, la prise de décision pour initier un dépassement et juger de sa faisabilité doit être rapide et précise. Dès lors, il convient de s'interroger sur les propriétés d'intérêts à prendre en compte par le conducteur.

Dans l'ensemble du manuscrit, nous envisageons les propriétés extrinsèques et intrinsèques suivant la définition faite par Warren (1984). Les premières auront trait aux propriétés environnementales, non dimensionnées au conducteur et exprimées dans des unités de mesure absolue (e.g., courbure de la route, hauteur de marche). Tandis que les secondes auront trait aux propriétés environnementales dimensionnées à l'individu (e.g., hauteur des yeux, capacité d'accélération d'un individu, etc.) et mesurées dans une même unité

conventionnelle. Ces propriétés intrinsèques seront donc exprimées comme un ratio, i.e., sans unité absolue.

I.1.2.1 L'enjeu des propriétés environnementales du dépassement

Comme nous l'avons montré précédemment, il y a aujourd'hui un véritable enjeu sociétal et scientifique à étudier le dépassement automobile. Certains chercheurs estiment que les propriétés déterminantes pour dépasser sont liées, en grande partie, à des propriétés physiques qualifiées d'extrinsèque car mesurées dans une unité absolue non dimensionnées à l'agent, telles que la géométrie de la route (courbure des virages, etc.). Ils ont en ce sens développé des modèles analytiques basés sur les équations de mouvement pour déterminer les distances requises lors d'un dépassement (Brown & Hummer, 2000; Glennon, 1988; Hassan, Easa, & El Halim, 1996; Llorca & García, 2011; Llorca et al., 2012; Polus et al., 2000), le temps de contact entre les véhicules (Baumberger, Flückiger, Paquette, Bergeron, & Delorme, 2005; Hegeman, 2008; Hegeman, Brookhuis, Hoogendoorn, & others, 2005; Hegeman, Tapani, & Hoogendoorn, 2009; Hegeman, van der Horst, Brookhuis, & Hoogendoorn, 2007; Milanes et al., 2012; Toledo & Farah, 2011) ou encore la géométrie de la route (Hegeman et al., 2009; Loewenau et al., 2006; Tapani, 2005; Yu, El Kamel, & Gong, 2014). D'autres chercheurs, à l'exemple de Buřič et Janovský (2007, 2009, 2013) ont tenté de modéliser le comportement de dépassement en intégrant le trafic des véhicules et en s'intéressant plus particulièrement à l'espace inter-véhiculaire ainsi qu'à la vitesse du véhicule à doubler.

Dans une étude plus récente, Gray et Regan (2005) ont mis en évidence les stratégies potentiellement mises en œuvre par les conducteurs dans l'initiation et la réalisation de leur dépassement automobile. Si de telles stratégies de dépassements existent, sur quelles propriétés sont-elles fondées ? Dans cette perspective, Gray et Regan (2005) se sont focalisés sur les propriétés de temps et de distances inter-véhiculaires utilisées dans les stratégies de contrôle et de prise de décision des conducteurs au cours des manœuvres de dépassement (Figure 2). Par exemple, les auteurs font l'hypothèse que les conducteurs perçoivent un temps requis pour doubler (TRO, calculé à partir de la vitesse et de la position du véhicule leader, de la vitesse de conduite du sujet et du modèle dynamique du véhicule sujet) et le comparent à un

temps de collision dépendant du trafic venant en sens inverse TTC (*Time To Collision*[6]) pour juger si le dépassement est sans danger.

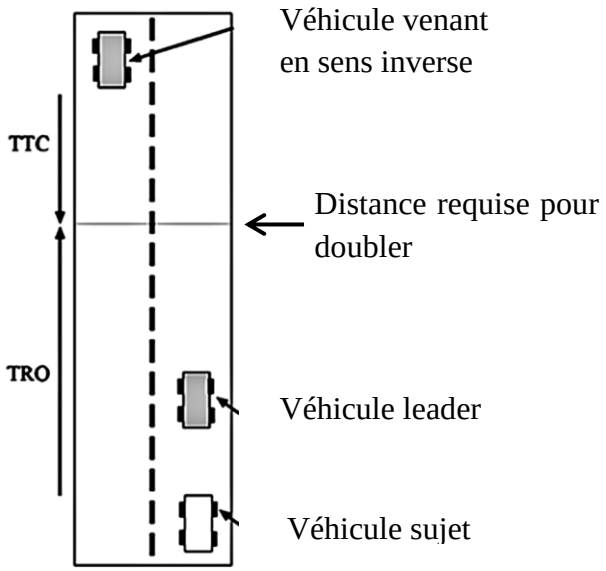


Figure 2 : Schéma représentant la situation de dépassement. Le véhicule sujet doit considérer le TRO (temps requis pour doubler), dépendant du véhicule leader, par rapport au TTC (temps de collision) d'un véhicule circulant en sens inverse. Schéma tiré de Gray et Regan (2005)

Si les conducteurs utilisent cette stratégie, alors lorsque TTC > TRO, c'est-à-dire lorsque le dépassement est considéré comme sans danger, les conducteurs devraient s'engager dans la manœuvre. À l'inverse, si TTC < TRO, le dépassement devient dangereux avec un risque majeur de collision, les conducteurs ne devraient pas s'engager dans la manœuvre. Conformément à leur hypothèse, les auteurs ont observé que les conducteurs décidaient de doubler quand TTC > TRO. Toutefois, ces derniers continuaient également à doubler (16% des essais) quand TTC < TRO.

Les auteurs ont alors mis au jour de larges différences individuelles dans la stratégie de contrôle utilisée pour l'initiation du dépassement automobile. Dans cette expérimentation réalisée sur simulateur de conduite à base fixe, un trafic en sens inverse était présent (expérimentation 2). Les conducteurs ont utilisé trois stratégies de contrôle : une stratégie de maintien d'un temps constant basé sur le temps entre le véhicule à doubler et le véhicule sujet ; une stratégie de maintien de distance constante entre le véhicule à doubler et le

[6] Le TTC est défini comme le temps limite séparant le véhicule sujet de la voiture venant en sens inverse, à partir duquel une collision se produit.

véhicule sujet ; enfin une double stratégie de temps et de distance constants lorsque les conducteurs conduisaient respectivement à des vitesses élevées et des vitesses faibles.

En parfaite concordance avec ce qui avait été observé dans la conduite réelle, les conducteurs ont commis un nombre d'erreurs considérable durant les manœuvres de dépassement. Ces erreurs peuvent être attribuées à deux causes majeures : le choix de la stratégie de conduite et le caractère inadapté des propriétés à partir desquelles le conducteur prend sa décision. Les résultats de Gray et Regan (2005) font donc écho aux récentes études ayant mis en évidence l'importance du temps de collision dans la réalisation d'un dépassement automobile (Hegeman, 2008; Hegeman et al., 2009). Les travaux précédents de Benedetto, Benedetto, De Blasiis, et Giunta (2004) et Gray et Regan (2000), effectués sur un simulateur de conduite, ont, quant à eux, porté sur la propriété temporelle du TTC, considérée comme une propriété fiable pour initier et réaliser un dépassement en toute sécurité.

Compte tenu de la grande diversité des stratégies de contrôle du dépassement et de la variabilité des résultats en termes de performance, les propriétés temporelles décrites par les auteurs semblent être inadéquates pour caractériser la prise de décision des conducteurs lors d'un dépassement automobile. En effet, bien que la stratégie de dépassement visant à utiliser le TTC-TRO informe le conducteur sur les contraintes temporelles du dépassement, cette dernière n'apporte aucune information concernant la vitesse nécessaire à atteindre pour réussir le dépassement. En d'autres termes, si le conducteur se déplace à une vitesse courante inférieure à sa vitesse maximale, il ne sera plus capable de percevoir si un dépassement est possible ou non, sur la seule base du TTC-TRO.

Il s'agit à présent de donner un aperçu des études ayant pris le parti d'intégrer les propriétés intrinsèques au conducteur dans l'étude du comportement de prise de décision lors d'un dépassement automobile.

I.1.2.2 L'enjeu des propriétés du conducteur

Certains chercheurs ont pris le parti d'étudier les processus de prise de décision et de réalisation d'un dépassement automobile en se focalisant sur l'influence des propriétés intrinsèques au conducteur – telles que la dynamique du véhicule conduit (e.g., vitesse, accélération) (Bar-Gera & Shinar, 2005; Jamson, Chorlton, & Carsten, 2012; Jenkins & Rilett, 2004, 2005; Llorca, Garcia, Moreno, & Maria Perez-Zuriaga, 2013; Mohaymany et al.,

2010a), les ressources cognitives et les stratégies de recherches visuelles (Cantin *et al*., 2009), l'âge (Cantin et al., 2009; Clarke et al., 1998; Farah, 2011; Matthews et al., 1998; Mohaymany et al., 2010a; Zhang et al., 1998), ou encore le genre (Cantin et al., 2009; Farah, 2011; Llorca et al., 2013; Mohaymany et al., 2010a; Özkan & Lajunen, 2006),– sur la probabilité de dépasser.

L'étude de Bar-Gera et Shinar (2005) est une des rares à avoir axé la modélisation du comportement automobile de dépassement sur une propriété physique liée à la dynamique du véhicule. Ils se sont intéressés à des propriétés physiques telles que la vitesse, pour comprendre les manœuvres de dépassement. L'étude réalisée en simulateur de conduite avait pour objectif, d'une part, d'examiner la tendance des conducteurs à doubler d'autres véhicules et d'autre part, de caractériser les manœuvres de dépassement. Plus précisément, cette étude a évalué le seuil de vitesse différentielle (i.e., vitesse entre le véhicule sujet et le véhicule à doubler) pour lequel les conducteurs prenaient la décision de doubler un véhicule placé devant eux (Figure 3). Les conducteurs placés dans un simulateur de conduite à base fixe rencontraient des véhicules devant eux qui étaient programmés pour rouler à une vitesse qui était soit en dessous soit au-dessus de leur vitesse courante ou encore égale à cette dernière. Le scénario du simulateur n'incluait aucun trafic dans la direction opposée et le délai de décision de dépassement en fonction de l'espace inter-véhiculaire n'était pas évalué contrairement au cadre expérimental utilisé par Pollatschek et Polus (2005), Buřič et Janovský (2007, 2009, 2013), Cantin et al. (2009), Farah et Toledo (2010), Toledo et Farah (2011) ou encore Llorca, Garcia, et al. (2013).

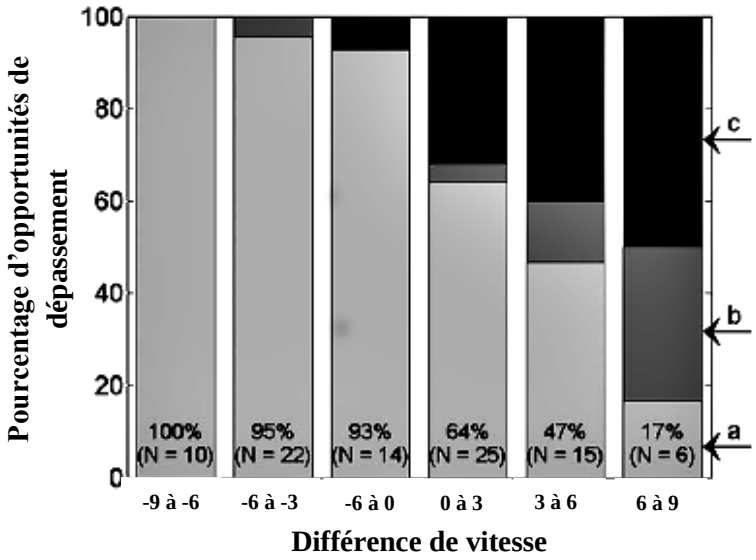


Figure 3 : Distribution des actions des conducteurs en fonction de la différence entre la vitesse du véhicule à doubler et la vitesse moyenne du véhicule sujet, en km/h. Les différences de vitesse négatives indiquent que la vitesse moyenne du véhicule sujet est supérieure à la vitesse du véhicule à doubler (a) A doublé ; (b) N'a pas doublé, mais le voulait ; (c) N'a pas doublé. Graphique tiré de Bar-Gera et Shinar (2005)

La tendance au dépassement apparaît comme étant intimement liée à la variabilité entre la vitesse du véhicule conducteur et du véhicule leader (Jenkins & Rilett, 2004) : plus le différentiel de vitesse inter-véhicule est variable, plus il y a de probabilités pour que le conducteur sujet se base sur cette variabilité et double le véhicule leader, y compris lorsque la vitesse de ce dernier est supérieure à la vitesse moyenne du véhicule sujet (Figure 3). Les résultats sont interprétés en termes d'agressivité du conducteur et de charge mentale associées à l'incapacité de doubler le véhicule devant soi. Ces observations font écho aux récentes études portant sur l'agressivité au volant (Stephens & Groeger, 2011) et la charge mentale associées aux conditions routières et à leur complexité (Cantin et al., 2009; Polus et al., 2000). Aucune discussion n'est toutefois menée sur l'influence possible des capacités d'action du véhicule conduit, définies en termes de cinématiques, dans la réalisation d'un dépassement automobile.

Notre objectif est à présent de discuter les études qui se sont intéressées à la fois aux propriétés de l'environnement et aux propriétés du conducteur pour comprendre précisément les mécanismes sous-jacents à la prise de décision et à la réalisation d'un dépassement automobile.

I.1.2.3 Prise en compte des propriétés du couple conducteur-environnement

De récentes études ont tenté d'expliquer, dans une démarche holistique, la sélection d'un mode d'action aussi complexe que le dépassement en s'intéressant notamment à l'impact des propriétés intrinsèques telles que le sexe ou le genre (Farah, 2013; Toledo & Farah, 2011; Vlahogianni, 2013) et l'âge du conducteur (Farah, 2013; Farah, Bekhor, & Polus, 2009; Toledo & Farah, 2011) sur la prise en compte de propriétés extrinsèques telles que l'espace inter-véhiculaire (Farah et al., 2009; Vlahogianni & Golias, 2012), le temps de contact avec d'autres véhicules (Farah et al., 2009; Toledo & Farah, 2011), la densité de trafic (Farah et al., 2009) ou encore la différence de vitesse (Vlahogianni, 2013; Vlahogianni & Golias, 2012).

Dans la continuité de ses précédents travaux, Farah (2013) avait pour objectif de modéliser les propriétés d'intérêt pouvant influencer le temps et la distance d'un dépassement. Pour élaborer son modèle de dépassement automobile, Farah a utilisé les données recueillies à l'aide d'un simulateur de conduite (Figure 4). Le modèle proposé par Farah (2013) prend en compte l'impact des conditions de trafic, de la géométrie de la route, des vitesses des véhicules à doubler et des véhicules roulant en sens inverse ainsi que les propriétés sociodémographiques des conducteurs (âge, genre et expérience de conduite).



Figure 4 : Scène visuelle décrivant le scénario de conduite. Scène visuelle tirée de Farah (2013)

Les résultats montrent que les conducteurs âgés prennent plus de temps et parcourent des distances plus longues durant leur dépassement que les conducteurs plus jeunes. La durée et la distance de dépassement sont significativement affectées par les propriétés du trafic

reliées au conducteur, au véhicule leader et à la voiture venant en sens inverse. Le genre du conducteur, la courbure de la route, et le type des véhicules à doubler et des véhicules roulant en sens inverse n'avaient pas d'impact significatif sur la durée et la distance du dépassement.

La principale contribution de cette étude réside dans le modèle empirique développé pour mettre en évidence les propriétés affectant le comportement de dépassement. Dans cette nouvelle étude de Farah (2013), il est important de souligner la démarche holistique – i.e., prise en compte de propriétés de l'environnement et de l'agent – initiée par ces auteurs dans la compréhension du comportement de dépassement. En effet, l'auteur considère des propriétés à la fois propres au conducteur mais également des propriétés dépendantes de la situation de dépassement (e.g., temps, distance de dépassement ou encore temps inter-véhiculaire minimal) pour tenter d'expliquer le déclenchement d'une manœuvre de dépassement.

Tout au long des expérimentations menées durant ma thèse, j'ai pris le parti d'étudier la prise de décision – et, dans une moindre mesure, la régulation de l'action – lors d'un dépassement automobile à travers le prisme de la psychologie écologique de la perception et de l'action qui propose un cadre théorique pertinent pour identifier les propriétés d'intérêt prises en compte par le conducteur. Dans les années 1970, le psychologue américain James Jérôme Gibson a mis en évidence l'indissociabilité entre la perception et l'action ainsi que le lien mutuel entre l'agent et son environnement. Cette conception holistique de l'agent interagissant avec son environnement fait écho à la célèbre formule du philosophe français Merleau-Ponty (1976) selon laquelle « l'organisme donne forme à son environnement, en même temps qu'il est façonné par lui. ».

Le postulat central de ma thèse repose sur la nécessité de formaliser les possibilités d'action du conducteur, *affordances*, définies comme le ratio entre les propriétés du système agent-environnement (e.g., vitesse ou accélération minimum satisfaisante pour réussir un dépassement) et les propriétés de l'agent, i.e., les capacités d'action du conducteur (e.g., vitesse, accélération maximales des véhicules), pour mieux comprendre les mécanismes perceptivo-moteurs en jeu lors du dépassement automobile.

Il s'agit à présent d'introduire la théorie écologique et en particulier son concept central – l'*affordance* – pour justifier le choix de telles propriétés dans l'étude des comportements de dépassement automobile.

RÉSUMÉ :

- Le paragraphe précédent nous a permis de dresser un bilan des propriétés d'intérêt formalisées jusqu'à aujourd'hui dans l'étude de la prise de décision du conducteur lors du dépassement automobile. Il ne peut prétendre à l'exhaustivité mais reste néanmoins représentatif et révèle, en outre, la diversité des propriétés pouvant influencer la prise de décision du conducteur.

- Malgré la diversité des propriétés du conducteur et de l'environnement étudiées et intégrées dans les modèles censés rendre compte du comportement de dépassement automobile, aucune étude n'est encore parvenue à un consensus sur la pertinence des propriétés sélectionnées et sur leur utilité dans la prise de décision du conducteur.

I.2 Contexte théorique : l'*affordance* à l'épreuve du comportement

I.2.1 Le concept d'*affordance* : entre théorie et application

Des statistiques intéressantes mettent en évidence l'augmentation des études utilisant le concept d'*affordance* depuis les années 1970. Un relevé effectué le 5 février 2014 dans la base de données du *Web of Science*[7] indique un total de 785 occurrences du terme *affordance*. Si on ne trouvait que 0.26% du total des occurrences (i.e., 2 occurrences sur 785) en 1988, le terme *affordance* apparaît dans 9.8% du total des occurrences (i.e., 77 occurrences sur 785) en 2013. De plus, on constate une forte augmentation en 2007 avec 7.1% du total des occurrences (i.e., 56 occurrences sur 785) par rapport aux années 1990 pour lesquelles la moyenne est de 0.6% du total par an (i.e., 5 occurrences). L'année 2012 a connu un pic des occurrences du terme *affordance* avec 14.7% du total des occurrences (i.e., 115 occurrences sur 785).

Par ailleurs, le terme *affordance* apparaît dans près de 50 domaines de recherche allant de la psychologie avec 36.3% du total (i.e., 285 occurrences sur 785) à la robotique avec 8.8% du total (i.e., 69 occurrences sur 785) en passant par la linguistique avec 2% du total des occurrences (i.e., 16 occurrences sur 785). Remarquons également le faible nombre d'occurrences du terme dans le domaine du transport avec 0.25% du total (i.e., 2 occurrences sur 78, Figure 5).

[7] http://www.webofknowledge.com

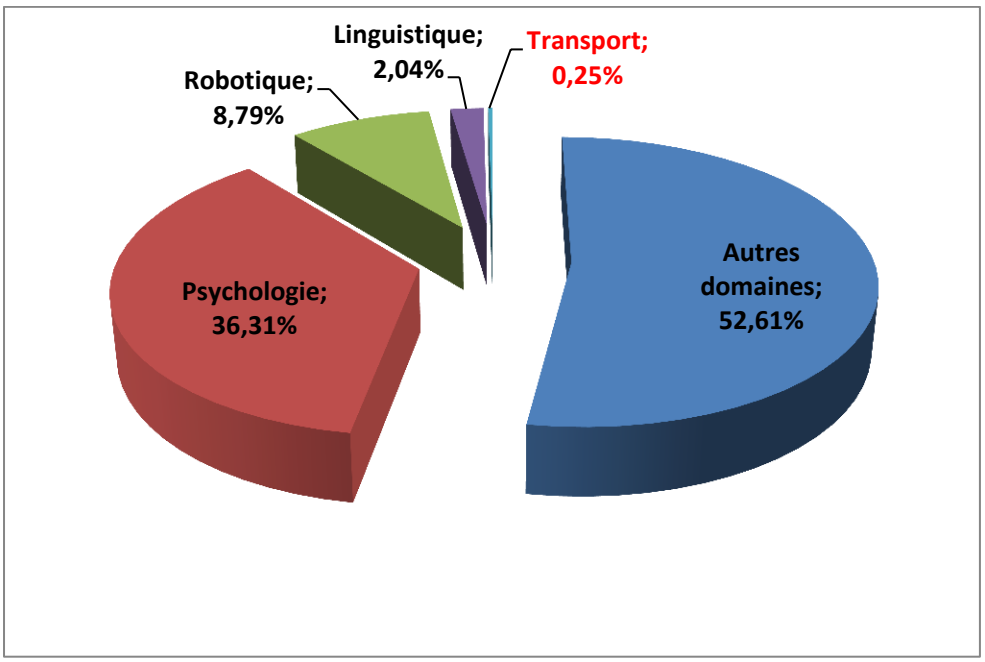


Figure 5 : Pourcentage d'occurrence du terme *affordance* en fonction des domaines de recherche depuis 1970.

Reste à comprendre quelles sont les origines conceptuelles de l'*affordance* à travers une brève mise au point épistémologique, étape préliminaire indispensable à la compréhension des propriétés pouvant influencer la prise de décision du conducteur et la réalisation du dépassement.

I.2.1.1 Le parti pris de J. J. Gibson : Conceptualisation et formalisation de l'affordance

L'*affordance* est un néologisme anglais élaboré par le psychologue américain James Jérôme Gibson dans son ouvrage *The senses considered as perceptual systems* publié en 1966 (p.285). Issue du verbe anglais « *to afford* » qui peut se traduire par offrir, permettre, fournir, la notion d'*affordance* s'inscrit dans le cadre théorique de la psychologie écologique. Ce néologisme traduit la faculté qu'ont les agents de guider leurs comportements en percevant ce que leur environnement leur offre en termes de possibilités d'action.

> « Les *invites* de l'environnement sont ce qu'il offre à l'animal, ce qu'il *fournit* ou *apporte*, que ce soit bon ou mauvais. Le verbe *permettre* se trouve dans le dictionnaire, mais le nom *affordance* n'y est pas[8]. Je l'ai construit. Je désigne par ce nom quelque chose qui réfère à la fois à l'environnement et à l'animal, dans un sens qu'aucun terme existant ne désigne. Ce dernier implique la complémentarité de l'animal et de l'environnement. » (J. J. Gibson, 1986, p. 127 / *Trad. Putois* p. 211)

Situer le concept d'*affordance* dans sa construction historique est une étape indispensable afin de comprendre les raisons du parti pris conceptuel et théorique de J. J. Gibson (1986). A fortiori J. J. Gibson reconnaît l'influence qu'ont pu avoir les psychologues gestaltistes – en particulier Koffka – et les fonctionnalistes[9] – William James et Holt par exemple – sur la conception de l'*affordance* (J. J. Gibson, 1986, p.xiii). J. J. Gibson énonce également l'influence, dans les années 1930, d'Edward Tolman – un des principaux promoteurs des thèses de la Gestalt aux États-Unis –[10] et de Leonard Troland (physicien américain du XIX^{e} siècle) sur l'élaboration de la théorie écologique.

Il est en ce sens important de rappeler que le courant gestaltiste a mis un point d'orgue à comprendre les comportements individuels par la conceptualisation des caractères de demande ou de valence d'un objet perçu à travers le postulat subjectif et phénoménologique de la perception. Lewin (1936) a en effet montré que la signification d'un objet (valence) dépendait uniquement des besoins de l'individu. En d'autres termes, les propriétés physiques d'un objet telles que le poids, la taille, la forme, etc. – propriétés objectives indépendantes d'un individu – n'ont aucune valence pour l'individu si ces dernières ne sont pas intégrées dans son champ phénoménal – i.e., champ d'action. Le principal défaut de la théorie gestaltiste est de maintenir cette dichotomie entre le subjectif et l'objectif en surévaluant la place du subjectif dans la compréhension du comportement. Pourtant, si nous prenons l'exemple de la boîte aux lettres, sa valence ou signification ne varie pas en fonction des besoins de l'individu. Elle présente en effet l'opportunité de poster une lettre à tout moment, qu'elle soit perçue ou pas.

[8] La traduction de cette phrase diverge volontairement de celle d'Olivier Putois afin de se rapprocher davantage du texte original.
[9] Le fonctionnalisme s'intéresse à la notion d'adaptation à l'environnement des individus et met l'accent sur l'utilité des actions mentales plutôt que sur le contenu de la conscience, contrairement aux structuralistes.
[10] Il devance le concept d'affordance 40 ans plus tôt avec son concept de « *manipulanda* » qu'il définit comme: « (…) le caractère des objets qui permettent (…) l'activité motrice (les manipulations) ».

> « Pour Koffka, la boîte aux lettres *phénoménale* invitait à envoyer du courrier, non la boîte aux lettres *physique*. Mais cette dualité est pernicieuse. Je préfère dire que la boîte aux lettres réelle (l'*unique* boîte aux lettres) invite un humain qui écrit des lettres à envoyer des lettres au sein d'une communauté dotée d'un système postal. Ce fait est perçu lorsque la boîte aux lettres est identifiée comme telle, et il est appréhendé aussi bien lorsque la boîte aux lettres est offerte au regard que lorsqu'elle y est soustraite.» (J. J. Gibson, 1986, p. 139/ *Trad. Putois* p. 228)

Selon J. J. Gibson, il faut dépasser cette dichotomie et formuler un nouveau concept qui parvienne à lier l'objectivité physique de l'environnement à la subjectivité de l'agent qui perçoit. Pour ce faire, un changement du niveau d'analyse dans l'étude de l'interaction agent-environnement est nécessaire afin que l'objectivité physique des objets de l'environnement soit signifiante, autrement dit porteuse de sens pour l'agent. Le niveau d'analyse pertinent pour étudier la perception de l'agent ne peut donc pas se situer dans l'infiniment petit (atome) ni dans l'infiniment grand (cosmos).

Étudier l'interaction de l'agent avec son environnement doit donc se faire à un niveau d'analyse écologique. Le terme écologique traduit l'adaptation de l'agent à son milieu, i.e., à son environnement défini comme niche écologique. La théorie écologique utilise ce terme pour désigner l'environnement et ne doit pas être considéré comme un synonyme de monde extérieur (J. J. Gibson 1986, p.129). Il ne s'agit donc plus d'un monde extérieur dépourvu de signification mais d'un environnement interdépendant avec l'Homme. Par exemple, à l'échelle des animaux, la surface de la Terre n'est pas courbe, mais essentiellement plane et horizontale, tandis que la gravité est perpendiculaire et verticale à ces derniers (J. J. Gibson, 1966, p.7). Le système agent-environnement constitue donc l'unité fondamentale d'analyse de l'approche écologique et résulte du postulat de lien mutuel ou de réciprocité entre l'agent et son environnement (Luyat & Regia-Corte, 2009).

I.2.1.1.1 *Comment définir l'affordance ?*

Décrire un monde physique du point de vue comportemental et fonctionnel nous amène à définir et à identifier les propriétés du système agent-environnement susceptibles d'être utiles à l'agent pour interagir avec son environnement. Selon J. J. Gibson (1986, p.127),

l'agent ne perçoit donc pas des propriétés physiques abstraites à enrichir – dimensionnement d'un espace en unité de mesure – mais il perçoit l'invariant qui spécifie une propriété du système agent-environnement mise en relation avec une propriété anthropométrique ou une capacité d'action. L'invariant accède au statut d'information dès lors qu'il est perçu et utilisé par l'agent. Dans le cadre de la théorie écologique, la spécification est définie comme « le processus qui lie de manière univoque les patrons ambiants d'énergie et la réalité physique que ces patrons révèlent » (Bardy & Mantel, 2006; J. J. Gibson, 1986). En ce sens, l'agent perçoit directement des possibilités d'action offertes par l'environnement.

Hormis le cas particulier d'une lumière ambiante non structurée, les *affordances* – i.e., les possibilités d'action – sont, de fait, constamment disponibles dans l'environnement et porteuses d'une signification non ambiguë qui est propre à l'agent qui les perçoit. Pour un agent donné par exemple, prendre la décision de traverser un lac en hiver dépendra de propriétés de rigidité de la glace (suffisantes ou non) compte tenu de son poids. Cette *affordance* de « traversabilité » pourra être directement perçue et utilisée par l'agent désireux de traverser le lac. La perception des *affordances* va donc contraindre et orienter le comportement de l'agent en l'informant sur la justesse de la décision à prendre. L'agent est ainsi renseigné sur la dangerosité d'une action, la facilité de réalisation d'une action, etc.

> « Les invites sont des propriétés considérées en référence à l'observateur. Elles ne sont ni physiques ni phénoménales. » (J. J. Gibson, 1986, p. 143/ *Trad. Putois* p. 234).

Par ailleurs, la perception d'une *affordance* va également orienter le comportement de l'agent en lui indiquant le mode d'action le plus approprié qu'il doit sélectionner dans une situation donnée. Par exemple, comme nous l'envisagerons plus précisément dans une prochaine partie[11], dans une situation de franchissement d'obstacle, l'individu est capable de percevoir le moment où le mode d'action bipédique ne sera plus suffisant pour franchir un obstacle sans encombre. Il optera alors pour un nouveau mode d'action en quadrupédie (Warren, 1984). En d'autres termes, en permettant à l'agent de prendre connaissance de ce qu'il peut faire ou ne pas faire dans une situation donnée, l'*affordance* rend possible un contrôle prospectif de l'action (Turvey, 1992), i.e., une régulation de l'action au cours du temps sans anticipation préalable, indispensable à toute prise de décision.

[11] cf. p. 56

L'*affordance* susceptible d'être perçue peut ainsi être formalisée à partir des propriétés pertinentes du système agent-environnement, pour effectuer une action donnée, référées aux propriétés de l'agent (propriétés anthropométriques, capacités d'action, …) (Chemero, 2003; J. J. Gibson, 1986; Stoffregen, 2000; Warren, 1984). Les propriétés du système agent-environnement ne sont pas perçues, en ce sens, selon une échelle de mesure extrinsèque (mètres, secondes, etc.) mais en référence aux propriétés intrinsèques de l'agent (anthropométriques, énergétiques, etc.). Selon J. J. Gibson (1986), l'agent ne percevrait non pas les dimensions métriques d'un mur mais plutôt sa « franchissabilité ». Cette conceptualisation gibsonienne de l'*affordance* transcende la dichotomie « subjectif-objectif » et situe son analyse au niveau d'une physique écologique fonctionnelle à mi-chemin entre la subjectivité gestaltiste et l'objectivité physique d'un monde extérieur (Niveleau, 2006, p.193) : l'*affordance* est une propriété écologique, renvoyant indissociablement aux propriétés de l'environnement et aux capacités de l'agent (J. J. Gibson, 2014, p. 500).

> « Une invite passe outre la dichotomie entre le subjectif et l'objectif et nous aide à saisir son caractère inadéquat. Elle est autant un fait de l'environnement qu'un fait de comportement, elle est à la fois physique et psychique, et cependant ni l'un ni l'autre. Une invite fait signe dans les deux directions, vers l'environnement et vers l'observateur. » (J. J. Gibson, 1986, p. 129/ *Trad. Putois* p. 214).

Les *affordances* sont donc des propriétés du système agent-environnement qui déterminent ce qui peut être réalisé (e.g., Stoffregen 2003). Par ailleurs, leur existence ne dépend pas de l'état émotionnel ou des intentions de l'agent, ni du fait qu'elles sont ou non perçues (Mantel, Bardy, & Stoffregen, 2007). Ce dernier aspect, point de divergence majeur avec les gestaltistes, revêt une grande importance dès lors qu'il s'agit d'étudier le comportement décisionnel de l'agent. Pour une situation donnée, il existe une infinité d'*affordances* potentiellement détectables et utilisables par l'agent. C'est en cela que l'*affordance* est qualifiable d'opportunité d'action (Darras & Belkhamsa, 2008; Luyat & Regia-Corte, 2009) dont la détection et l'utilisation ne dépendrait que de l'intention de l'agent et de sa capacité à prélever correctement l'*affordance*. Toutes les *affordances* perçues ne sont donc pas réalisées.

> « Le concept d'invite est dérivé de ces concepts de valence, d'invitation et d'exigence, mais avec une différence cruciale : l'invite de quelque chose *ne change pas* en fonction des changements des besoins de l'observateur. L'observateur peut percevoir ou ne pas percevoir l'invite, y être attentif ou non, en fonction de ses besoins, mais l'invite, étant invariante, est toujours présente et susceptible d'être perçue. Une invite n'est pas octroyée à un objet par le besoin d'un observateur qui accompagnerait la perception de cet objet : l'objet offre ce qu'il offre parce qu'il est ce qu'il est. » (J. J. Gibson, 1986, pp. 138-139/ *Trad. Putois* p. 227).

I.2.1.1.2 *Affordances et mécanismes perceptivo-moteurs*

Dans ce document, nous nous intéressons à l'identification des propriétés du système agent-environnement et des propriétés de l'agent ainsi qu'à la formalisation des mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent la sélection et, dans une moindre mesure, la régulation d'un mode d'action (e.g., doubler, ne pas doubler, se rabattre). Nous postulons que la perception d'une *affordance* permet au conducteur de sélectionner et de réguler (Fajen, 2007a) un dépassement automobile (Figure 6). Dans le respect du principe de dépendance mutuelle entre la perception et l'action (J. J. Gibson, 1986), nous intégrons la sélection et la régulation d'un mode d'action dans une relation circulaire entre la perception d'invariants optiques de haut niveau spécifiant les propriétés du système environnement-agent et la réalisation d'une action orientée vers un but. Cette dépendance mutuelle traduit les modifications de l'arrangement optique ambiant engendrées par la mise en mouvement de l'individu qui, en retour, perçoit les conséquences optiques de son action et peut fournir les ajustements moteurs nécessaires à sa réussite.

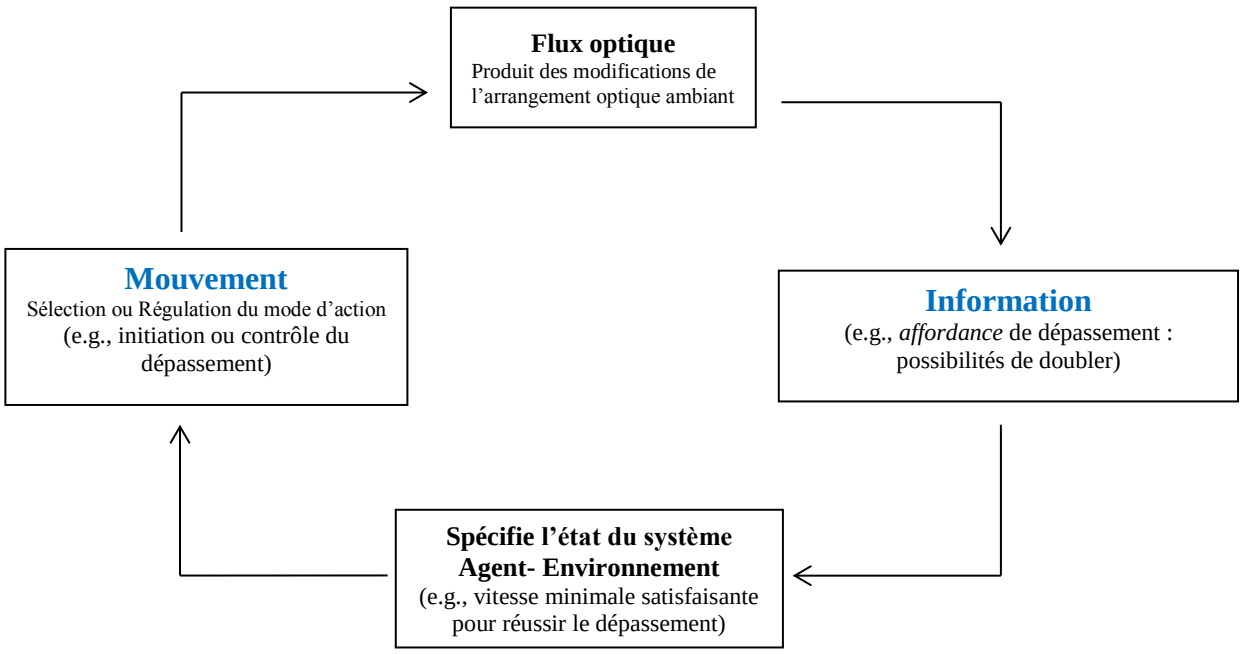


Figure 6 : Illustration du postulat relationnel entre l'information et le mouvement sous-jacent à la sélection et à la régulation d'un dépassement automobile.

Par ailleurs, nous discuterons dans les parties suivantes des possibilités d'étudier expérimentalement la sélection et la régulation d'un mode d'action en analysant la pertinence de certaines propriétés d'intérêt (e.g., cinématiques du véhicule conduit : vitesse, accélération). Il ne s'agit donc pas, dans le cadre de ce manuscrit, d'identifier le support perceptif d'une *affordance* de dépassement (e.g., taux d'expansion optique) mais plutôt d'identifier les propriétés d'intérêt à même de rendre compte de la sélection et de la régulation du dépassement. Ceci implique la formalisation de propriétés qui résument les stratégies perceptivo-motrices mises en place durant le dépassement. Ces propriétés peuvent être, par exemple, d'ordre cinématique et spécifier la vitesse minimale satisfaisante à atteindre pour réussir un dépassement (*MSV*), l'accélération maximale d'un véhicule (*Amax*), etc.

Dans le cadre de ce manuscrit de thèse, notre ambition consiste à identifier les propriétés les plus à même d'être utilisées par le conducteur. Il s'agit en effet de formaliser les 'stratégies' perceptivo-motrices sous-jacentes via les propriétés du système agent-environnement et les propriétés de l'agent. Ci-dessous, une représentation schématique (Tableau 1) qui résume la(les) relation(s) directe(s) et univoque(s) existant entre une

information et une propriété du système agent-environnement. Cette illustration permet, de différencier ce qui est de l'ordre de l'information et ce qui est de l'ordre de la propriété spécifiée.

Tableau 1: Niveaux d'analyse théorique du comportement perceptivo-moteur. La perception directe de l'information donne accès aux propriétés spécifiées du système agent-environnement à travers une relation unique et univoque.

	Informations	Propriétés	Relations
Perception directe			Univoques Uniques Directes

Il convient à présent de mettre en évidence de manière plus approfondie la variété des propriétés du système agent-environnement sous-jacentes à la prise de décision et dans une moindre mesure à la régulation de l'action de l'agent dans divers contextes et situations. Nous montrerons en quoi un certain type d'*affordance* est particulièrement pertinent dans l'étude comportementale de la prise de décision et de la régulation de l'action du conducteur lors d'une tâche de dépassement automobile.

RÉSUMÉ :

- Le cadre conceptuel de l'*affordance* ne peut se comprendre qu'à travers une mise en perspective historique des courants gestaltiste et fonctionnaliste dont J. J. Gibson s'est inspiré.
- Les *affordances*, peuvent être décrites comme des propriétés du système agent-environnement, pertinentes pour effectuer une action donnée et considérées en référence aux propriétés de l'agent (Chemero, 2003; J. J. Gibson, 1986; Stoffregen, 2000; Warren, 1984).
- Les propriétés du système agent-environnement ne sont pas perçues dans une échelle de mesure extrinsèque (mètres, secondes, etc.) mais en référence aux propriétés de l'agent (anthropométriques, énergétiques, etc.), dans une échelle de mesure intrinsèque.
- Dans ce document, nous postulons que la sélection et la régulation d'un mode d'action sont sous-tendues par la perception d'une *affordance*.

I.2.1.2 « Attrapabilité », « franchissabilité », « freinabilité »…l'enjeu des affordances

L'*affordance* traduit la faculté des animaux à sélectionner et orienter leurs comportements en percevant ce que leur environnement leur offre en termes de possibilités d'action. Pour produire un comportement adapté, i.e., sélectionner des modes d'action appropriés aux différentes situations auxquelles il est confronté, l'animal doit être capable de prélever de manière adéquate les propriétés relationnelles de l'*affordance* émergeantes de son interaction avec l'environnement (Temprado & Montagne, 2001). Comme le souligne Turvey *et al.*, (1992) : « Le succès d'un comportement dépend de l'habileté à percevoir quelles actions sont possibles et quelles actions ne sont pas possibles ». Le choix d'un mode d'action (e.g., choisir de courir ou de sauter) serait donc influencé par la perception d'une *affordance* traduisant les possibilités d'action d'un agent dans son environnement. Comme nous l'avons souligné précédemment, la perception des *affordances* permet à l'individu de prendre connaissance de ce qu'il peut faire ou ne pas faire dans une situation donnée.

Face aux nombreuses situations d'évitement d'obstacle (e.g., monter des escaliers, traverser un passage piéton sans encombre) ou de prise de décision urgentes auxquelles nous sommes quotidiennement confrontés (e.g., marcher au sein d'une foule dense ou encore entrer dans le métro avant que les portes ne se ferment), comment l'*affordance* nous renseigne-t-elle sur la faisabilité d'une action ? Comment formaliser mathématiquement la perception et l'utilisation d'une *affordance* ? Cette perception est-elle toujours opérante dès lors qu'il s'agit d'envisager des propriétés du système agent-environnement, en relation avec des propriétés de l'agent d'ordre anthropométrique, biomécanique ou énergétique?

Depuis la première définition du concept d'*affordance* par J. J. Gibson (1966, 1977), de nombreuses recherches empiriques ont démontré la perception et l'utilisation des *affordances* à travers différentes modalités perceptives (e.g., visuelle, auditive, tactile, etc.) et dans de nombreuses situations aux contraintes très variées. Certains de ces travaux ont par exemple étudié la « passabilité » des ouvertures de portes – i.e., la perception du caractère passable d'une ouverture – (Warren & Whang, 1987) plus ou moins mouvantes (Fajen & Matthis, 2013), l' « assoyabilité » des surfaces (Mark et al., 1997; Mark & Vogele, 1987), ou encore l' « attrapabilité » d'un objet (Bastin, Fajen, & Montagne, 2010; Carello, Grosofsky, Reichel, Solomon, & Turvey, 1989; Solomon & Turvey, 1988; Solomon, Turvey, & Burton,

1989). En se basant sur les différentes recherches ayant étudié l'*affordance*, Fajen (2005b) ont catégorisé deux types d'*affordance* : celles qui sont dimensionnées à des propriétés anthropométriques, i.e., à des dimensions mesurables du corps de l'agent (e.g., la longueur de jambe) et celles qui sont dimensionnées aux capacités d'action de l'agent (e.g., l'accélération maximale pouvant être produite). Tout l'intérêt de définir l'*affordance* à partir des capacités d'action serait notamment de déterminer comment l'*affordance* sera utilisée tout au long de l'exécution motrice. La perception d'une *affordance* permettrait ainsi non seulement de sélectionner les actions à effectuer, mais également de réguler l'activité motrice pendant l'exécution de l'action (Fajen, 2005b).

Aussi s'agit-il à présent de dresser un état des lieux de la perception des *affordances* dimensionnées à des propriétés anthropométriques et à des capacités d'action dans des situations variées, d'en discuter les possibles limites et d'identifier leurs influences sur la prise de décision – et, dans une moindre mesure, sur la régulation de l'action – de l'agent.

I.2.1.2.1 *Prise de décision et affordances dimensionnées aux propriétés anthropométriques*

Depuis les années 1980, de nombreux travaux scientifiques ont entrepris de confronter la perception des *affordances* à des actions quotidiennes telles que le fait de s'asseoir, de monter des marches, de franchir une porte, etc.

Le point de départ de ces différentes recherches est la formalisation du concept d'*affordance* à partir d'une mesure anthropométrique élaborée par Warren en 1984. Dans une étude où des individus devaient juger avec précision leur capacité à monter des marches, Warren a formalisé la relation entre l'individu et l'environnement par l'expression d'un ratio sans dimension nommé π entre une propriété de l'environnement *E* et une propriété de l'agent *A*, toutes deux pertinentes pour une action donnée. En considérant que les deux propriétés (*E* et *A*) sont mesurées dans une même unité conventionnelle, alors les unités disparaissent et le ratio π ainsi obtenu devient sans dimension (Warren, 1984). Dans l'étude de Warren, la

propriété de l'environnement (*E)* est définie par la hauteur de marche à gravir et la propriété de l'agent (*A*) est définie par la longueur de jambe du sujet (Figure 7A). La hauteur de marche ainsi que la longueur de jambe du sujet étant exprimées en cm, on obtient un ratio π sans dimension: $\pi = \frac{E}{A}$. Le ratio π ne désigne pas nécessairement un rapport au sens mathématique, mais traduit le fait qu'une quantité est prise en référence à une autre – i.e., dans une échelle de mesure intrinsèque. Tout l'intérêt du ratio π est qu'il est modifié à mesure que la situation change, i.e., en fonction de l'évolution des propriétés du système agent-environnement. Ainsi, à partir d'une valeur donnée du ratio π, appelée point critique (e.g., Warren, 1988), l'individu transiterait d'un mode d'action à un autre. Ce postulat a été mis à l'épreuve à travers trois expérimentations.

Dans une première expérimentation, deux groupes de jeunes hommes de tailles différentes – petites (163.7cm) et grandes (189.8 cm) – devaient juger le caractère « montable » (i.e., en bipédie, sans s'aider des mains) de différentes hauteurs de marches (de 50.8 à 101 cm) par le biais de photos qui leurs étaient présentées. Pour Warren (1984), l'objectif de cette tâche de jugement perceptif est de valider son modèle biomécanique en montrant que les sujets parviennent à estimer avec une grande précision le point critique pour passer d'un mode d'action bipédique à quadrupédique. Comme escompté, la hauteur de marche critique (correspondant à 50% des jugements du caractère « montable » des marches) est plus faible (Figure 7B) pour les individus de petites tailles (67.13 cm) que pour le groupe de grande taille (81.32 cm). Toutefois, lorsque l'on exprime le pourcentage des jugements de « montabilité » des marches en fonction du ratio entre la hauteur de marche et la longueur de jambe (ratio π), les courbes de pourcentages des jugements positifs et négatifs se superposent (Figure 7C) et indiquent un point critique égal à 0.88 validant de ce fait le modèle biomécanique de Warren établi *a priori*. En d'autres termes, les individus, quelle que soit leur taille, jugent une marche montable en mode bipédique (i.e., sans s'aider des mains) si cette dernière n'excède pas 88% de la longueur totale de la jambe de l'individu.

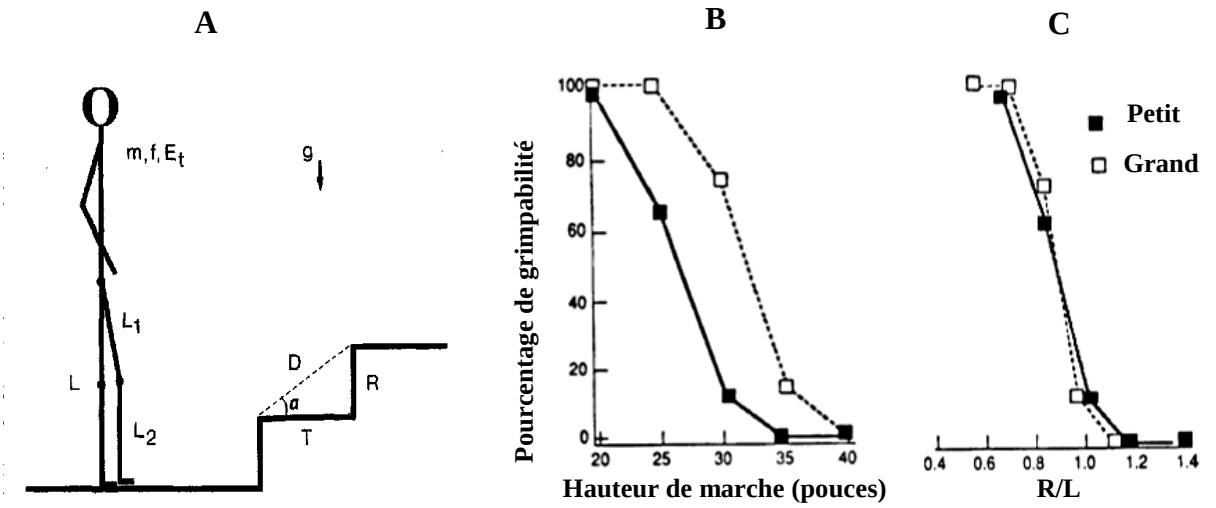


Figure 7 : Estimation du caractère « montable » d'un escalier en bipédie. A) Les propriétés extrinsèques de l'environnement sont définies par la hauteur de la contremarche (R), la profondeur de la marche (T), et la force gravitationnelle (g). Les propriétés intrinsèques de l'individu sont la longueur de jambe (L), la masse du corps (m), la fréquence de marche (f), et la dépense énergétique par unité de temps (E_t). B) Lorsque la probabilité d'estimer un escalier « montable » est exprimée en fonction de la hauteur de la contremarche (unité extrinsèque), les jugements diffèrent selon la taille de jambe des sujets (les symboles □ sont utilisés pour décrire les grandes longueurs de jambe ; les symboles ■ pour les petites). C) Lorsque la probabilité d'estimer un escalier comme « montable » est exprimée en fonction du ratio hauteur de contremarche ÷ longueur de jambe, les jugements sont similaires quelle que soit la taille de jambe des individus. Illustration tirée de Warren (1984)

Cette expérimentation révèle la capacité des agents à percevoir les propriétés du système agent-environnement qui caractérisent une *affordance* : la perception de ce qui est possible et de ce qui ne l'est plus dans une situation donnée. À travers cette étude, Warren a été le premier chercheur à proposer et à valider chez l'Homme une formalisation mathématique de l'*affordance*. Cette étude formalise ainsi le processus de prise de décision de l'individu dans sa capacité à choisir le mode d'action adapté à une situation.

L'étude de Warren et Whang (1987) a mis en évidence, quant à elle, l'influence de la hauteur des yeux effective dans le jugement de la faisabilité d'une action et donc dans la prise de décision des individus. En l'occurrence, des individus divisés en deux groupes (épaules larges et épaules étroites) devaient juger la « passabilité » de différentes portes, dont la largeur était modifiée, en indiquant pour quelles conditions ils sélectionneraient le mode d'action « tourner les épaules » pour franchir la porte. Lorsque les résultats sont exprimés dans une mesure extrinsèque (Figure 8A et C), le groupe des individus aux épaules plus larges juge une porte comme étant passable pour des ouvertures plus grandes que le groupe des individus aux épaules étroites, qu'il s'agisse de conditions de jugements statique ou en mouvement. Toutefois, les résultats ont révélé un ratio π (largeur de la porte / largeur des épaules) de 1.16 quasiment identique entre les estimations effectuées de manière statique et en mouvement

(Figure 8B et D). En d'autres termes, les individus, quelles que soient leur largeur d'épaules et leur activité (statique ou en mouvement), jugent une porte comme étant « passable » (i.e., franchissable sans tourner les épaules) si la largeur de porte (Figure 8B et D) n'excède pas 116% de la largeur totale de leur épaule. Dans la précédente étude de Warren (1984), le ratio π (hauteur de marche/longueur de jambe) était égal à 0.88 pour les individus aux grandes et petites jambes. Cette différence de ratio entre les deux études s'explique par l'existence d'une relation constante entre la hauteur des yeux en station debout (notée *e*) et la largeur d'épaule des individus (notée *S*). En ce sens, l'information spécifiant le ratio entre des propriétés de largeur d'ouverture (notée *A*) et de hauteur des yeux en station debout (notée *e*) fournit une information relative au ratio *A*/*S*. Par ailleurs, Warren a indiqué que la largeur d'épaule des individus était égale en moyenne à 0.25 de leur hauteur des yeux (*S*/*e* = 0.25), d'où : $A/e = 0.25 \times A/S$. Les jugements perceptifs distinguant les franchissements d'ouverture possible et impossible (*A*/*S* = 1.16) sont ainsi spécifiés par une valeur à la marge du ratio de la hauteur des yeux : *A*/*e* = 0.29.

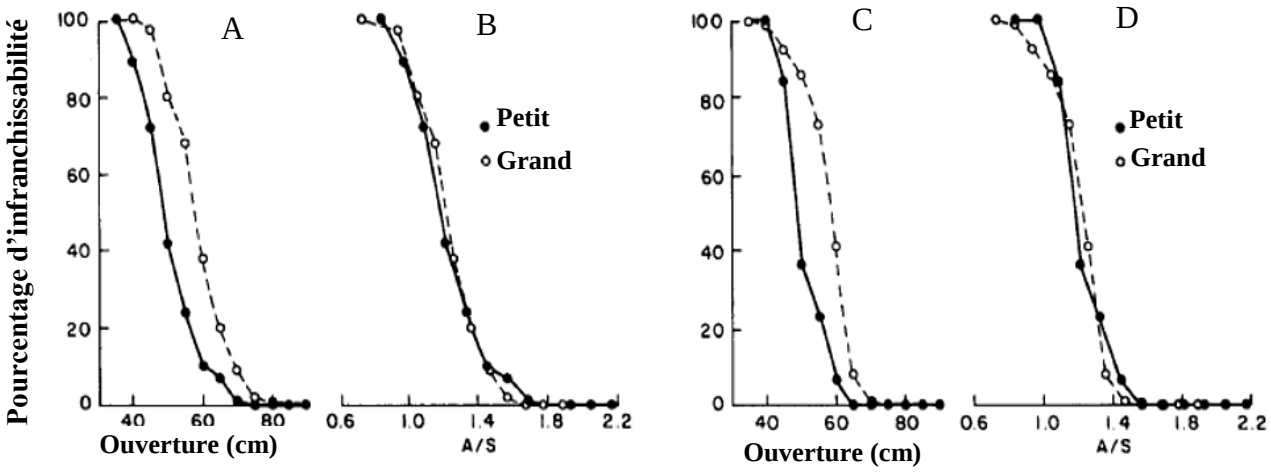


Figure 8 : Pourcentages moyen de jugements « infranchissable » réalisés par les groupes de petite (●) ou de grande largeur d'épaules (○), dans une condition de jugement statique (A et B) ou en mouvement (C et D) et exprimés en fonction d'une mesure extrinsèque (A et C, cm) ou intrinsèque (B et D, %). Graphique tiré de Warren et Whang (1987)

Ces résultats mettent en évidence la capacité des individus à percevoir des *affordances* dimensionnées à des propriétés anthropométriques. La sélection d'un mode d'action est ainsi sous-tendue par la détection d'une information dimensionnée en fonction de la hauteur des yeux de l'observateur et accessible visuellement dans la configuration optique.

D'autres recherches se sont intéressées à de telles propriétés de la relation agent-environnement dans lesquelles la prise de décision s'appuie sur la perception d'*affordances* dimensionnées à des propriétés anthropométriques dans des tâches aussi diverses que l' « atteignabilité » de cibles ou d'objets (Carello *et al*., 1989; Huang, Ellis, Wagenaar, & Fetters, 2013), la « franchissabilité » d'obstacles (Cornus, Montagne, & Laurent, 1999; Stefanucci & Geuss, 2010; Wagman & Malek, 2008), la « montabilité » de marches (Kinsella-Shaw, Shaw, & Turvey, 1992; Maraj, 2003; Mark, 1987; Mark & Vogele, 1987; Sato & Yoshimoto, 2008) ou encore la « passabilité » de portes ou d'ouvertures (Stefanucci & Geuss, 2009; White & Shockley, 2005; Wraga, 1999).

Depuis ces études princeps en matière d'*affordance* dimensionnée à des propriétés anthropométriques, d'autres chercheurs ont enrichi la compréhension du comportement de prise de décision de l'acteur. Parmi ces dernières, il convient de citer les travaux de Mark (1987) dans lesquels la perception d'une *affordance* d'atteignabilité est étudiée. L'auteur montre que le passage d'un mode d'action vers un autre peut se produire avant que le ratio π n'ait atteint le point critique. Mark introduit l'expression de « limite critique préférée » par opposition à la limite critique absolue de Warren (1984). Mark explique le choix d'un mode d'action anticipé par une volonté de l'individu de minimiser l'énergie dépensée durant l'action. Un autre aspect très intéressant de cette étude et en lien direct avec notre problématique de recherche, est la démonstration d'une prise en compte de propriétés variées dans la sélection d'un mode d'action. Il ne s'agit plus uniquement de dimensionner des propriétés de l'environnement en fonction de propriétés anthropométriques statiques mais également de les dimensionner aux capacités d'action de l'individu, capables d'améliorer la pertinence du mode d'action choisi dans la réalisation de l'action.

De nombreuses recherches vont s'emparer de ce nouvel objet d'étude consistant à prendre en compte des propriétés dynamiques de l'individu percevant. La prise en compte de propriétés biomécaniques de l'individu, telles que la force ou la souplesse notamment, variables en fonction de l'âge ou le mode d'action sélectionné (Carello *et al*., 1989; Cole, Chan, Vereijken, & Adolph, 2013; Cornus, 1998, pp. 31–32), mais également l'activité motrice (e.g., marche, course, etc.) de l'individu au moment où il perçoit (Franchak, Celano, & Adolph, 2012; Franchak, van der Zalm, & Adolph, 2010; Oudejans, Michaels, Bakker, & Dolné, 1996; Oudejans, Michaels, van Dort, & Frissen, 1996; Wagman & Malek, 2007; Wilmut & Barnett, 2010, 2011) connaissent des enjeux théoriques majeurs.

Dès lors, les chercheurs vont élargir les dimensionnements de l'*affordance* en intégrant les propriétés dynamiques de l'acteur directement dimensionnées à l'action dans le but d'affiner la compréhension du comportement de prise de décision. Ainsi s'agit-il à présent d'étudier les recherches qui amènent un nouvel enrichissement des *affordances* et par la même des propriétés en jeu.

RÉSUMÉ :

- Nous avons dressé l'inventaire des principales études ayant mis en évidence la prise en compte *d'affordances* dimensionnées à des propriétés anthropométriques dans le comportement de prise de décision et donc dans la sélection d'un mode d'action adapté à une situation donnée.

- Ces études ont notamment montré que la prise de décision de l'acteur dépendait de la valeur du ratio π (Warren, 1984), formée par la relation entre une propriété de l'environnement (e.g. hauteur de marche) ou du système agent-environnement et une propriété anthropométrique de l'agent (e.g., longueur de jambe). Le point de transition d'un mode d'action vers un autre (e.g., bipédie vers quadrupédie) se produit à une valeur dite critique.

I.2.1.2.2 *Prise de décision et affordance dimensionnée à l'action*

Dans un très grand nombre de situations quotidiennes (e.g., évitement d'obstacle pendant la marche, navigation dans un environnement routier complexe, etc.) les individus doivent connaître les capacités de mouvement de leurs corps, ou encore les capacités des appareils motorisés qu'ils conduisent – qualifiées de capacités d'action – pour agir avec réussite dans leur environnement. Comme le soulignent Fajen et Matthis (2011), les piétons doivent connaître leurs capacités locomotrices pour décider de traverser une rue ou alors patienter pour laisser passer le véhicule, s'ils estiment que leur vitesse de marche ne sera pas suffisante pour éviter la collision (Oudejans, Michaels, van Dort, *et al.*, 1996; Plumert, Kearney, & Cremer, 2007; te Velde, van der Kamp, Barela, & Savelsbergh, 2005).

De la même façon, les conducteurs automobiles doivent connaître très précisément les capacités d'action de leurs véhicules, définies en termes de propriétés cinématiques (e.g., capacités d'accélération, de freinage, etc.) au moment de décider de l'initiation d'un dépassement ou d'un freinage pour éviter un obstacle ou un véhicule plus lent (Fajen, 2005c, 2007b). Ces quelques exemples d'activités perceptivo-motrices soulignent l'importance de percevoir l'environnement en relation avec ses capacités d'action réelles, i.e., percevoir quelles actions sont possibles compte tenu de ses limites d'action. De ce fait, en raison d'un grand nombre de propriétés intrinsèques à l'individu susceptibles d'intervenir dans la définition d'une *affordance*, les auteurs préfèrent ainsi formaliser ces propriétés étudiées en termes de capacités d'action réelles (i.e., dimensionnement par l'action : Fajen, 2005a; Fajen et al., 2009; J. J. Gibson, 1986; Turvey, 1992; Warren, 1988) plutôt que par une mesure anthropométrique (i.e., dimensionnement corporel : Warren & Whang, 1987; Warren, 1984).

Les premières études à s'être interrogées sur l'apport de propriétés dimensionnées à l'action, ont mis en évidence, à travers des tâches de jugements de montabilité notamment, la prise en compte de propriétés intrinsèques telles que la cinétique des individus (e.g., élasticité musculaire, flexibilité des membres en fonction de l'âge) dans l'exécution de l'action. Les *affordances* ainsi perçues étaient donc à la fois dimensionnées à des propriétés anthropométriques (i.e., dépendantes du ratio hauteur de marche / longueur de jambe), comme c'était déjà le cas dans les études traditionnelles, mais également dimensionnées à l'action.

Dès lors, de nombreuses études dont celle de Meeuwsen (1991) ont entrepris l'identification de telles propriétés dynamiques. À travers une tâche similaire à celle de Warren (1984), i.e., estimer le caractère montable d'une marche réalisable à l'aide d'un mode d'action bipédique, Meeuwsen s'interroge sur les propriétés susceptibles d'affecter la perception des possibilités d'action lors de la montée de marche. Dans son étude, le chercheur a donc identifié les effets de la mobilité des articulations de hanches et de la force des jambes sur les possibilités d'action perçues et atteintes (absolue ou relative, i.e., hauteur de la contremarche divisée par la longueur de jambe) dans la montée de marche en mode bipédique. D'après l'auteur, si les limites d'action sont directement perçues et si l'action est intimement liée à la perception, on devrait être capable de quantifier ces limites d'action (Warren, 1984) et d'identifier quelles propriétés peuvent les affecter.

Les résultats mettent en évidence que les jugements des sujets sont affectés par la souplesse des articulations de hanches. Par ailleurs, Meeuwsen montre que la force

musculaire de la jambe affecte également la perception des possibilités d'action absolue et relative des individus. À travers ces résultats, l'auteur a mis en évidence que des propriétés cinétiques modifiaient la perception des *affordances* de montabilité.

À la suite de cette étude, Konczak, Meeuwsen, et Cress (1992) ont également associé des *affordances* dimensionnées à l'action aux *affordances* dimensionnées à des propriétés anthropométriques en considérant l'âge des individus. Konczak *et al*. (1992) ont étudié le lien entre longueur de jambe, flexibilité de hanche, force de jambe et perception des *affordances* de montée de marches chez des sujets âgés, comparés à des sujets jeunes. Dans cette expérimentation, les sujets étaient soumis à trois contraintes biomécaniques : la longueur de jambe suffisante pour monter la marche ; la force musculaire de la jambe et la flexibilité de hanche pour placer le pied sur la marche ; la force musculaire de la jambe pour hisser le corps sur la marche (Figure 9). La perception de l'*affordance* de montabilité des marches nécessite donc de mettre en relation les propriétés de l'environnement et les propriétés anthropométriques des sujets mais aussi de considérer les propriétés biomécaniques (i.e., force et souplesse) variant en fonction de l'âge des participants.

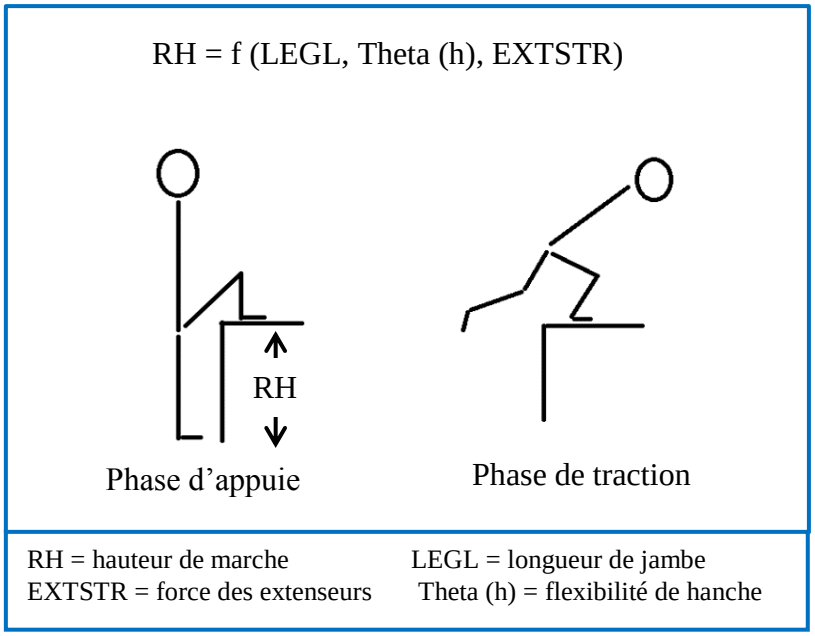


Figure 9 : Représentation des deux phases du franchissement de marche. L'atteinte de la hauteur de marche est fonction de la longueur de jambe (LEGL), de la flexibilité de hanche (Theta (h)), et de la force des jambes (EXTSTR). Représentation tirée de Konczak *et al.* (1992)

Les résultats révèlent des scores très proches, pour un même groupe d'individus, entre la perception des possibilités de monter une marche et les réelles capacités des individus à la gravir (Figure 10). Une différence plus marquée est toutefois présente pour les jeunes adultes en comparaison aux sujets âgés. Presque deux tiers des sujets âgés ont une relation correcte entre ce qu'ils perçoivent et leurs capacités d'action réelles. En revanche, seulement un tiers des jeunes adultes ont une relation correcte entre leurs jugements perceptifs et leurs capacités d'action réelles. Konczak *et al.* (1992) expliquent cette différence par le fait que l'étendue des capacités d'action des sujets âgés est plus réduite, ils sont donc davantage sensibles aux changements des propriétés des objets. De plus, une mauvaise perception de l'*affordance* de montée de marche aurait des conséquences bien plus graves chez ce type de population que chez les jeunes adultes (e.g., fracture de hanche).

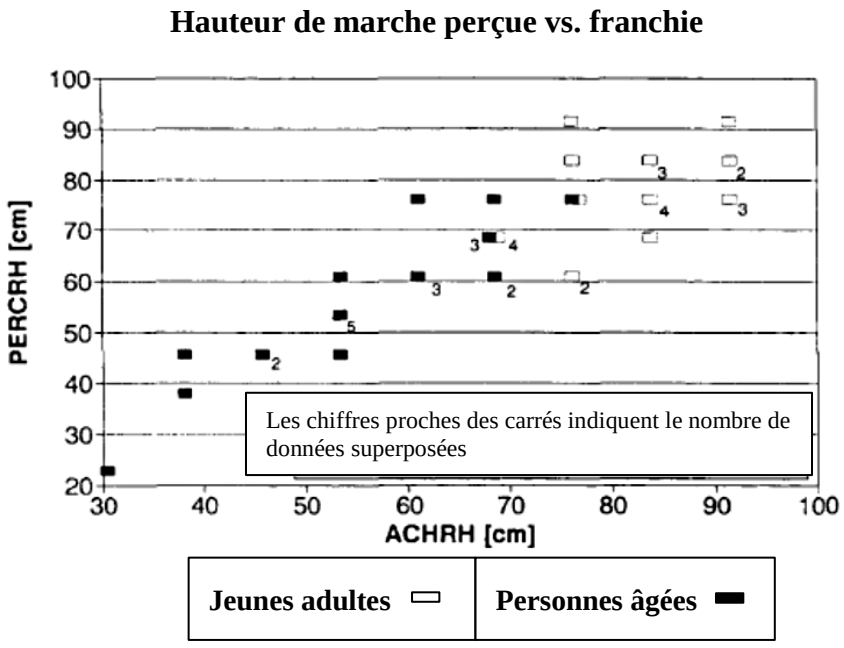


Figure 10: Hauteur de marche perçue (PERCRH) exprimée en fonction de la hauteur de marche franchie (ACHRH). Les jeunes adultes sont représentés par des rectangles blancs et les personnes âgées par des rectangles noirs. Graphique tiré de Konczak *et al.* (1992).

Par ailleurs, la meilleure adéquation des jugements perceptifs est obtenue lorsque la régression sur la performance des individus intègre leurs propriétés biomécaniques telles que la souplesse des articulations de hanche ou la force des extenseurs de jambes dépendantes de l'âge des participants. En résumé, Konczak *et al*. ont montré que la perception de la montabilité des marches et la sélection de modes d'action est fonction des multiples

contraintes biomécaniques dont certaines dépendent de propriétés anthropométriques et d'autres de propriétés cinématiques ou cinétiques.

D'autres études abordant la question de la perception des *affordances* d' « atteignabilité », dont celle de Mark *et al.* (1997), ont également entrepris l'identification de propriétés dimensionnées à l'action. À travers une tâche d'atteinte de cible réalisable à l'aide de différents modes d'action (e.g., avec le bras seul, en se penchant en avant, en étendant l'épaule), les chercheurs questionnent la perception d'une *affordance* d'atteignabilité. Comment expliquer la prise de décision d'un individu lorsque plusieurs modes d'action coexistent, alors même que les valeurs critiques du ratio π n'ont pas encore été atteintes (cf. Warren, 1984) ? Mark *et al.* démontrent que la prise de décision des individus dépend de propriétés dimensionnées à l'action, telles que la minimisation de l'énergie dépensée. Par ailleurs, ils qualifient la valeur correspondante à cette prise de décision anticipée de limite critique préférée par opposition à la limite critique absolue dépendante du ratio *π*, définie par Warren (1984). Par cette étude, Mark *et al.* étendent les propriétés prises en compte par les individus lors de la perception d'une *affordance* et de ce fait, enrichissent les propriétés du système agent-environnement à considérer. Les résultats présentés améliorent la compréhension du comportement de prise de décision.

Une étude plus récente de Pepping et Li (2000) confirme la prise en compte de propriétés dimensionnées à l'action dans l'exécution d'une action d'atteinte en volley-ball. Il était demandé aux participants de sauter pour atteindre un objet situé à différentes hauteurs. Au moyen d'une ceinture lestée, les expérimentateurs ont augmenté de 10% le poids des participants. Pepping et Li montrent que la hauteur maximale jugée comme atteignable par les participants varie en fonction de l'augmentation de leur poids. Les auteurs mettent en évidence l'adaptation perceptivo-motrice des participants conformément aux changements de leurs capacités d'atteinte du fait du lestage. Cette adaptation est rendue possible par la perception de propriétés extrinsèques (e.g., hauteur des objets) mise en relation avec des propriétés intrinsèques aux participants, relatives à la fois aux dimensionnements corporels, mais également aux dimensionnements de l'action. Les participants sont alors capables de percevoir la dynamique de leurs capacités d'action à travers une *affordance* d'atteignabilité dimensionnée à l'action.

L'étude de Weast, Shockley et Riley (2011) fait écho aux résultats de Pepping et Li (2000), Regia-Corte et Wagman (2008), ou encore de Cesari, Formenti, et Olivato (2003), relatifs aux dimensionnements de l'*affordance* à des propriétés dynamiques du sujet (e.g., vitesse de course, élasticité de la jambe, fatigue musculaire). Les auteurs ont également mis en évidence l'influence de l'expérience dans la perception d'une *affordance* d'atteignabilité, dans la lignée d'Oudejans, Michaels, et Bakker (1997).

Dans la première expérimentation, des joueurs de basketball et des joueurs novices ont fourni des estimations perceptives sur des *affordances* les concernant et concernant les autres joueurs dans des actions spécifiques à ce sport (atteinte maximum debout et hauteur d'atteinte en sautant, Figure 11A) et non spécifiques (hauteur d'assise maximum, Figure 11B). L'étude a montré que les joueurs de basketball étaient plus précis dans la perception d'*affordances* dimensionnées à des propriétés cinématiques – pour d'autres joueurs – liées à leur sport que ne l'étaient les joueurs novices. En revanche, ils n'étaient pas meilleurs lorsqu'il s'agissait des *affordances* dimensionnées à des propriétés anthropométriques, à la fois spécifiques et non spécifiques au basket-ball.

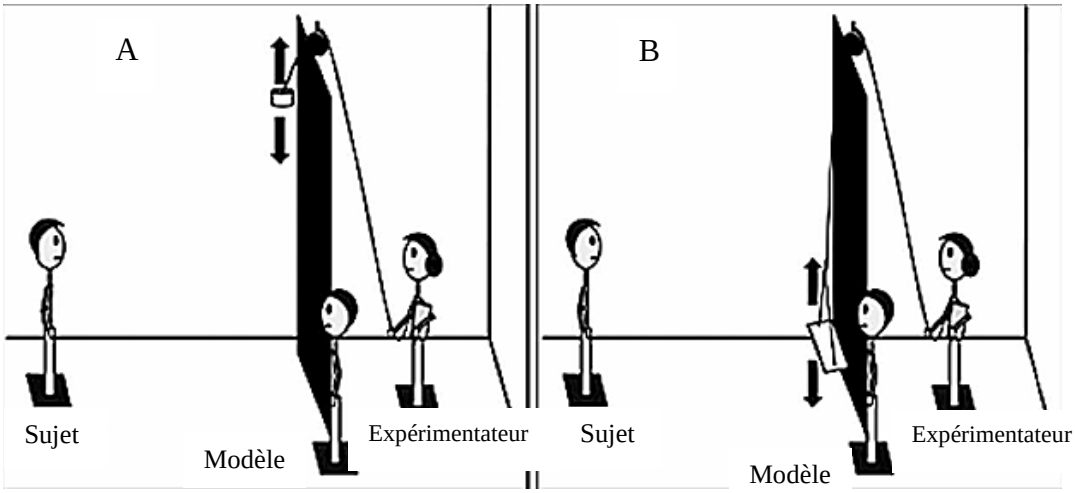


Figure 11 : Le dispositif expérimental comprend la position du sujet (joueur de basket-ball ou non), le modèle (non joueur de basket-ball) et l'expérimentateur qui manipulait les conditions d'atteinte de la cible spécifique au basket-ball (estimation d'atteinte maximum de la cible en étant debout, debout et autorisé à sauter, Panneau A) et non-spécifique au basket-ball (estimation d'atteinte maximum de la hauteur d'assise, Panneau B)[12]. Équipements et dispositifs expérimentaux tirés de Weast et al. (2011).

[12] Ce dispositif fait référence à Mark (1987), Stoffregen, Gorday, Sheng, & Flynn (1999), Ramenzoni, Riley, Davis, Shockley, & Armstrong (2008), Ramenzoni, Riley, Shockley, & Davis (2008a, 2008b).

Dans la seconde expérimentation, Weast *et al.* (2011) se sont intéressés aux propriétés susceptibles d'améliorer l'habileté des joueurs de basket-ball à percevoir la hauteur d'atteinte d'un saut (*affordance* dimensionnée à l'action spécifique) d'autres joueurs (co-équipiers ou adversaires). Pour ce faire, les auteurs ont évalué si les propriétés cinématiques du patron de marche d'un joueur informaient davantage les participants sur des *affordances* dimensionnées à l'action (hauteur d'atteinte en sautant) plutôt que sur des *affordances* dimensionnées à des propriétés anthropométriques (atteinte maximum debout et assise). Il s'agissait également d'évaluer si l'expérience améliorait la sensibilité des joueurs à ces propriétés cinématiques. Les auteurs ont démontré que seule la perception d'*affordance* dimensionnée à l'action, i.e., à des propriétés cinématiques, était améliorée après une exposition au patron de marche d'un joueur. Par ailleurs, les résultats mettent en évidence que seuls les joueurs de basketball ont amélioré leur perception d'une *affordance* dimensionnée à l'action avec l'exposition à une propriété cinématique. Ces résultats confirment que ce type d'*affordance* est spécifié par des propriétés relationnelles d'ordre cinématique relatives à la vitesse de marche ou au patron de marche des joueurs de basket-ball, par exemple. Enfin, les résultats démontrent que les joueurs de basket-ball ont plus facilement accès aux propriétés cinématiques pour lesquelles ils sont déjà éduqués en vertu de leur expérience sportive.

Par ailleurs, une des recherches princeps à avoir étudié la capacité des sportifs à percevoir leurs possibilités d'action réelles a été élaborée par Oudejans *et al.* (1996). L'étude consiste à projeter des balles de tennis en l'air, en face et derrière le participant, en faisant varier la durée de vol de la balle ainsi que son lieu de retombée. Il est demandé aux participants, dans une première condition (condition perceptive) de juger l'attrapabilité de la balle sans bouger. Dans une seconde condition (condition d'atteinte de balles), il est demandé aux participants d'essayer d'attraper les balles. Oudejans *et al.* ont démontré que les jugements d'attrapabilité de balle correspondent précisément à leur capacité d'attrapabilité réelle à condition que les participants soient autorisés à bouger pendant un temps très bref (1s) avant leur jugement. Cette étude révèle que les participants sont capables de percevoir les *affordances* dimensionnées à leurs capacités d'action, définies dans des propriétés cinématiques, tout comme ils peuvent percevoir des *affordances* dimensionnées à leurs dimensions corporelles.

De nombreux autres chercheurs ont étudié la prise en compte des capacités d'action individuelles dans la sélection des modes d'action, à partir de tâches sportives (Dicks, Davids,

& Button, 2010; Paterson, van der Kamp, Bressan, & Savelsbergh, 2013) ou encore de traversées d'intersection (Chihak *et al*., 2010; Grechkin, Chihak, Cremer, Kearney, & Plumert, 2013; Oudejans, Michaels, van Dort, *et al*., 1996; Plumert, Kearney, & Cremer, 2004; Plumert *et al*., 2007; Plumert, Kearney, Cremer, Recker, & Strutt, 2011; te Velde *et al*., 2005). Dans certaines études, les capacités d'action dépendent des développements perceptivo-moteurs (Chihak et al., 2010; Ishak, Franchak, & Adolph, 2014; Plumert et al., 2004, 2007, 2011) de l'individu et semblent confirmer que la perception des *affordances* dimensionnées à l'action est liée à une certaine expérience dans l'exploration de l'environnement nécessaire à la calibration perceptivo-motrice de l'individu.

Fajen (2005a, 2005b, 2005c, 2007a) s'est emparé de cette problématique et a montré que la perception d'une *affordance* dimensionnée à l'action n'est pas seulement importante pour prendre une décision quant au mode d'action à utiliser (i.e., essayer de traverser ou attendre), mais elle est également importante dans le contrôle en ligne de l'action (Warren, 1984, 1988). D'après Fajen (2009), le contrôle en ligne est indispensable car les capacités d'action individuelles constituent des contraintes critiques à la réussite de la tâche. Ceci ne va pas à l'encontre d'une certaine flexibilité comportementale. Comme le soulignent Fajen *et al.* (2011), un receveur au football américain peut démarrer lentement sa course, accélérer progressivement et attraper la balle tout en courant ou alors démarrer très rapidement, se positionner à l'emplacement prévu de retombée de la balle et attendre que cette dernière retombe. Il pourra également suivre une trajectoire rectiligne ou alors suivre une trajectoire courbe. En d'autres termes, la seule condition de réussite pour le receveur de football américain sera de se déplacer de sorte que la vitesse minimum satisfaisante pour attraper la balle ne dépasse jamais sa vitesse maximale de course. Le joueur devra donc se déplacer de façon à rendre l'atteinte du ballon toujours possible. Fajen *et al.* mettent ainsi en évidence la capacité des individus à contrôler leurs actions en percevant une *affordance* dimensionnée à partir de propriétés cinématiques.

Nous nous proposons à présent d'approfondir cet aspect et d'en discuter les enjeux.

RÉSUMÉ :

- L'ensemble des études présentées jusqu'à présent révèle la capacité des individus à prendre des décisions (e.g. à sélectionner un mode d'action) adaptées aux contraintes de l'environnement en percevant des *affordances* dimensionnées à l'action (i.e., propriétés cinématiques, énergiques de l'individu).

- Il est apparu que la réussite d'une tâche de traversée d'intersection (Chihak *et al*., 2010; Louveton, Bootsma, Guerin, Berthelon, & Montagne, 2012) ou de franchissement d'ouverture dynamique (Fajen & Matthis, 2011), par exemple, requiert un contrôle en ligne de l'action. Dans une situation où les propriétés du système agent-environnement évoluent, il est indispensable pour l'individu de percevoir si ses capacités d'action suffiront à répondre aux contraintes de la tâche.

I.2.1.2.3 *Prise de décision et régulation de l'action : l'enjeu de l'affordance dimensionnée à l'action*

Dans les parties précédentes nous avons orienté notre propos sur la capacité des individus à percevoir les possibilités d'action – i.e., les *affordances* – offertes par l'environnement pour prendre une décision – i.e., sélectionner un mode d'action – appropriée aux contraintes de la tâche et ainsi agir avec réussite. Comme l'ont mis en évidence de nombreuses études, suivant les contraintes environnementales rencontrées et la nature du problème à résoudre (e.g., franchir une porte, attraper une balle, ou traverser une intersection) les individus sont en mesure de percevoir des *affordances* dimensionnées à l'action, à partir de propriétés cinématiques.

Le comportement de prise de décision n'est toutefois pas le seul comportement rendu possible par la perception des *affordances* dimensionnées à l'action. Depuis quelques années, de nombreuses études ont mis en évidence la capacité des individus à guider et à contrôler visuellement leur action de façon à maintenir (i.e., réguler) un « état idéal » en deçà de leurs capacités d'action maximales par la perception d'*affordances* dimensionnées à l'action

(Bastin et al., 2010; Fajen, 2005a, 2005b, 2005c, 2007a, 2007b, 2008a, 2008b; Fajen et al., 2011; Fajen & Matthis, 2011). Le terme « état idéal », employé ici par Fajen, représente la propriété pertinente du système agent-environnement qui est mise en relation avec les capacités d'action de l'individu afin de sélectionner ou de réguler un mode d'action. En l'occurrence, dans le cadre des études de Fajen, il s'agit d'une décélération idéale mise en relation avec les capacités de décélération maximale du véhicule conduit afin de produire un freinage approprié.

Fajen (2007a) conceptualise ce comportement de guidage visuel de l'action à travers l'*affordance-based control*. Cette nouvelle conceptualisation de l'*affordance* fait également écho aux propositions de Warren (1988). D'après Warren, la question de l'*affordance* et du contrôle de l'action sont deux éléments distincts. Il postule que l'individu opte dans un premier temps pour un mode d'action en percevant une affordance. Une fois le mode d'action sélectionné, l'action est régulée sur la base d'une loi de contrôle spécifique. Dès lors, comme le souligne Stoffregen (2000), l'*affordance* semble être exclusivement destinée à la sélection des comportements plutôt qu'au contrôle en ligne de l'action.

Fort de ce constat, Fajen démontre à travers plusieurs études que l'*affordance* doit être comprise comme un *continuum* entre la sélection d'un mode d'action et le contrôle en ligne de l'action. Fajen ajoute également une dimension temporelle au contrôle en ligne de l'action en précisant que l'état idéal – propriété pertinente du système agent-environnement – peut dépasser les limites d'action individuelle (Figure 12) rendant impossible la réussite de l'action. Une limite d'action représente une capacité d'action maximale définie dans une unité physique (e.g., vitesse, accélération, etc.) au-delà de laquelle un individu n'est plus en mesure de réguler son état courant pour réussir une action. Par exemple, un individu conduisant un véhicule avec une capacité de freinage maximale de 7 m/s² ne pourra pas éviter la collision avec un obstacle si la condition nécessaire est un freinage supérieur à 7m/s². Le conducteur ne pourra alors plus réguler son freinage (i.e., son état courant), dans le but de maintenir un freinage idéal (i.e., son état idéal) en deçà de sa limite de freinage maximale, i.e., sa limite d'action (Figure 12). Tout l'enjeu de récentes études est ainsi de démontrer que le conducteur prend la décision d'agir et de réguler son action par la perception de possibilités d'action l'informant en temps réelle de la faisabilité d'une action. En d'autres termes, le comportement moteur du conducteur répondrait à un processus perceptif simplifié ayant comme objet l'*affordance*. Ce dernier traduit des stratégies motrices plus complexes de régulation de l'état

courant afin de maintenir un état idéal dans une région de confort bornée par les limites d'action – e.g., décélération maximale – du véhicule conduit.

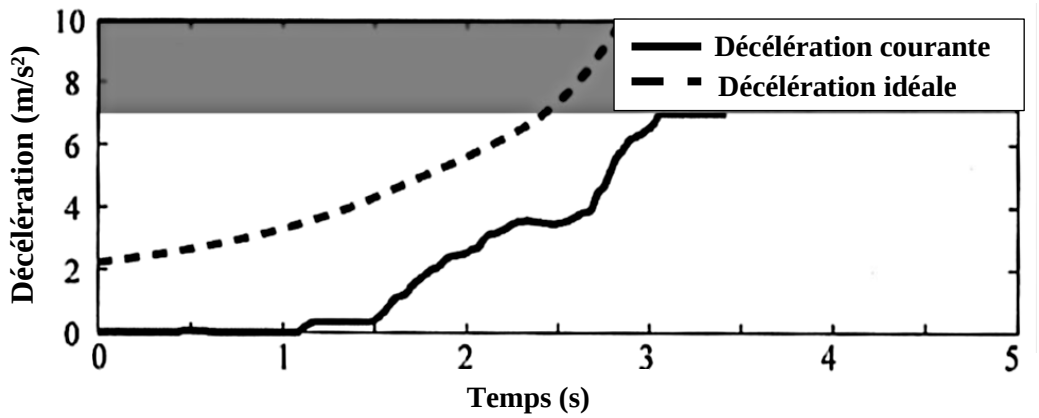


Figure 12 : Décélération courante (-) et idéale (- -) d'un conducteur lors d'une tâche de freinage. Dans cette situation, le conducteur n'est pas parvenu à maintenir la décélération idéale en deçà de sa capacité d'action maximale (7 m/s²), il entre ainsi en collision avec l'obstacle. Graphique tiré de Fajen (2005a)

Dans une série d'études relatives à des tâches de freinage (Fajen, 2005a, 2005c, 2007b, 2008a, 2008b; Fajen & Devaney, 2006) et à la perception des possibilités de décélération du conducteur (Fajen, 2005b), Fajen met en évidence la remarquable capacité des conducteurs à contrôler en ligne leur état courant – décélération courante – de façon à maintenir l'état idéal – ou décélération idéale – à l'intérieur d'une zone circonscrite par les limites d'action du véhicule – i.e., les capacités de freinage maximales (Figure 13). Pour ce faire, certains conducteurs ont adopté un style dit conservateur (Figure 13A) en freinant le plus rapidement possible de manière à circonscrire toute augmentation de la décélération idéale (en pointillé sur la figure) et ainsi éviter d'entrer en collision avec l'obstacle. Comme nous le montre, la Figure 13A, le conducteur initie son freinage courant (en trait plein sur la figure) suite à l'augmentation de la décélération idéale, ce qui permet d'éviter toute collision avec l'obstacle. La prise de décision du conducteur est suivie par une régulation du freinage courant autour de la décélération idéale. D'autres conducteurs, quant à eux, ont adopté un style de contrôle qualifié d'agressif en attendant le dernier moment avant que la décélération idéale ne dépasse leur décélération maximale pour freiner (Figure 13B). Comme nous le montre cette figure, le conducteur initie son freinage courant (en trait plein sur la figure) suite à l'augmentation sévère de la décélération idéale se rapprochant de la limite de décélération du conducteur. La prise de décision du conducteur est alors suivie par le maintien du freinage courant à hauteur du freinage maximal.

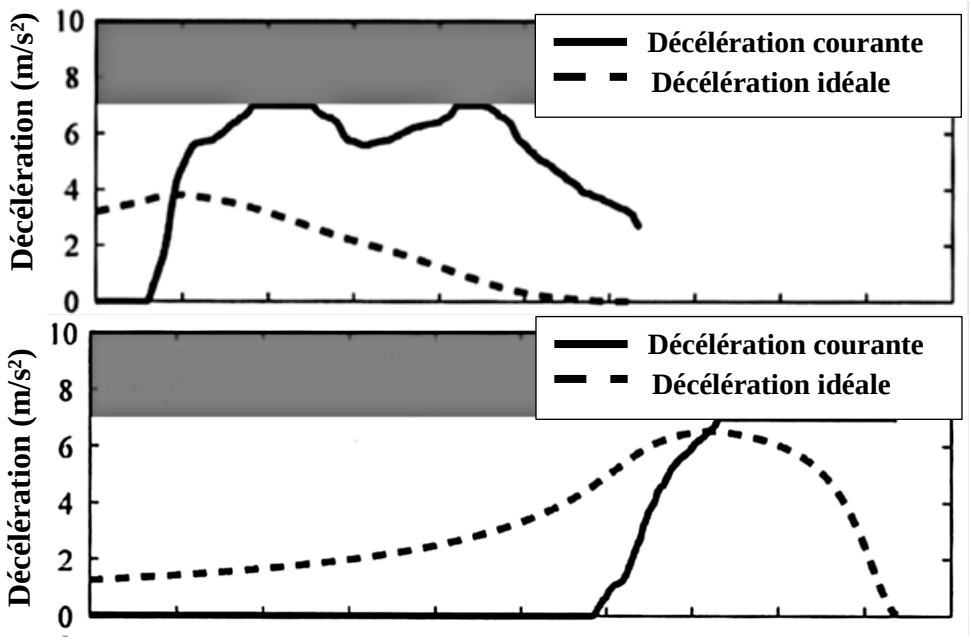


Figure 13 : Décélération courante (-) et idéale (- -) d'un conducteur lors d'une tâche de freinage. Dans cette situation (A), le conducteur adopte un style conservateur en maintenant le plus tôt possible la décélération idéale en deçà de sa capacité d'action maximale (7 m/s²). Il entre ainsi en collision avec l'obstacle. (B) D'autres conducteurs ont adopté un style agressif de contrôle en ligne du freinage en choisissant le dernier moment pour rattraper la décélération idéale et ainsi éviter d'entrer en collision avec l'obstacle. Graphique tiré de Fajen (2005a)

À travers ces expérimentations, Fajen démontre que la perception d'une *affordance* dimensionnée à l'action, à partir de propriétés cinématiques, permet non seulement de sélectionner un mode d'action approprié, mais également de réguler l'action en cours d'exécution. En outre, à travers ces différentes études sur le freinage (2005a, 2005c, 2007b), Fajen met en exergue la capacité des conducteurs à réussir la tâche de freinage malgré des manipulations des capacités de freinage des véhicules entre chacun des blocs d'essais (e.g., manipulation de la relation entre la force exercée sur le frein et le freinage effectif). Les participants ont réussi à s'arrêter avant l'obstacle en recalibrant leurs capacités d'action à mesure qu'ils interagissaient avec leur environnement. La calibration du système perceptivo-moteur au cours de l'action est en ce sens primordiale pour avoir accès aux limites d'action.

D'après Fajen (2007a) notamment, la calibration est définie comme un processus qui transforme la métrique dans laquelle l'information est détectée, en établissant une correspondance entre l'information et le mouvement. Une fois cette correspondance établie, les individus peuvent percevoir de manière fiable qu'une action est ou n'est pas dans leurs capacités – à partir des conséquences optiques de leurs mouvements – et peuvent ainsi contrôler leurs actions afin de les maintenir en deçà de leurs capacités d'action maximales.

Cela signifie que pour un individu engagé dans une action visuellement guidée, les seules unités signifiantes pour lui sont celles définies par ses capacités d'action. En l'occurrence, dans une tâche de freinage, il s'agira de la décélération maximale du véhicule conduit définie sur la base de propriétés cinématiques (Figure 13).

Par exemple, si le conducteur est correctement calibré il ne percevra pas une décélération idéale en unité extrinsèque (e.g., 4 m/s²), définie indépendamment du conducteur et donc sans signification pour ce dernier. Au contraire, si la décélération maximale du conducteur est égale à 10 m/s² le conducteur percevra une décélération idéale égale à 40% de sa décélération maximale, à l'exemple du ratio π (Warren, 1984). Des résultats expérimentaux (Fajen, 2005a, 2005c) viennent confirmer la calibration perceptivo-motrice des conducteurs lors d'une tâche de freinage. Trois groupes de conducteurs possédant chacun une décélération maximale différente (5, 7 et 9 m/s²) avaient pour consigne de s'arrêter aussi près que possible d'une cible représentée par le panneau stop. Si l'information spécifiant la décélération idéale est perçue en référence à la décélération maximale des conducteurs, nous devrions observer des différences comportementales intergroupes en mesure extrinsèque (i.e., en m/s², Figure 14A) qui s'estomperaient dès lors que les données comportementales sont exprimées en unité intrinsèque (i.e., en %, Figure 14B).

Afin de valider cette hypothèse, Fajen exprime les pourcentages d'ajustement du freinage résultant d'une augmentation de la décélération des conducteurs en fonction de la décélération idéale prise au début de l'ajustement du freinage. Conformément à l'hypothèse initiale, des différences entre les groupes de participants sont observées lorsque les pourcentages d'ajustement sont exprimés en référence à la décélération idéale à produire (Figure 14A). Plus précisément, plus la décélération maximale du conducteur est faible, plus ce dernier produit des ajustements de freinage afin de maintenir la décélération idéale en deçà de sa décélération maximale. Toutefois, aucune différence significative ne subsiste lorsque les pourcentages d'ajustement sont exprimés en référence à la décélération maximale des conducteurs (Figure 14B). Les conducteurs produisent des ajustements identiques dans leur freinage lorsqu'on les considère en référence à la capacité de freinage maximale.

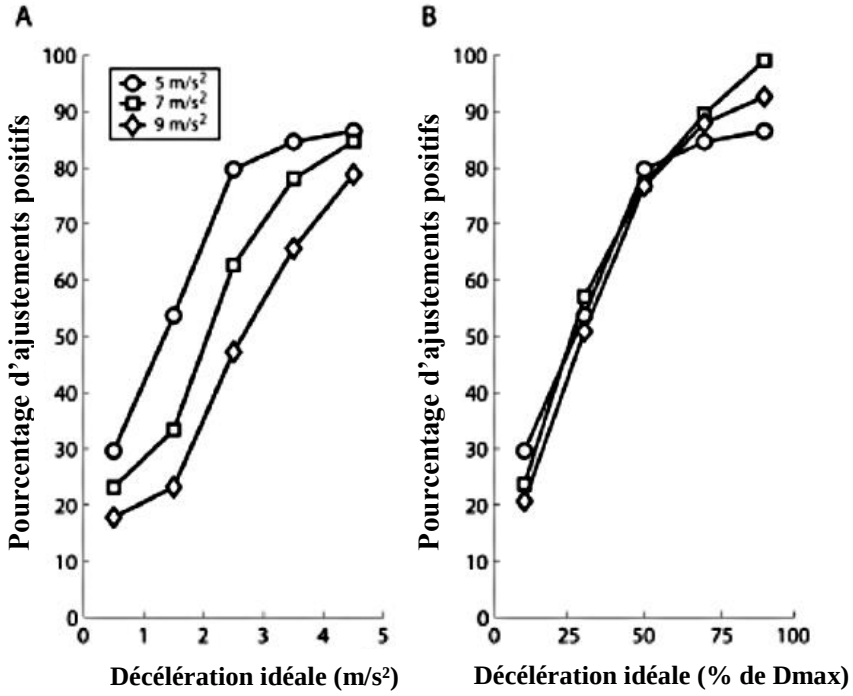


Figure 14 : Pourcentages d'ajustements du freinage des conducteurs exprimés en fonction de la décélération idéale prise au début de l'ajustement du freinage, dans une unité extrinsèque (Panneau A, m/s²), et exprimés en fonction de la même décélération idéale prise en référence à la décélération maximale des conducteurs, dans une unité intrinsèque (Panneau B, %). Dmax : décélération maximale. Graphique tiré de Fajen (2005c)

Dans le cadre de ma thèse, les deux premiers chapitres expérimentaux (cf. pp. 70-103) se concentreront majoritairement sur l'aspect décisionnel de l'*affordance* dimensionnée à l'action, à partir de propriétés cinématiques et en utilisant la formalisation de Warren (1984). Le troisième chapitre expérimental (cf. p. 131) testera la capacité du cadre proposé par Fajen (2005a, 2005c) à rendre compte à la fois des processus de prise de décision et de régulation de l'action dans des tâches de dépassement automobile.

Fort de ce constat, il s'agit à présent d'appliquer le cadre de la théorie écologique de la perception et de l'action à des situations de dépassement automobile. Une étape indispensable consistera à identifier les propriétés du système agent-environnement à même de décrire les mécanismes perceptivo-moteurs sous-jacents au dépassement.

RÉSUMÉ :

- L'enjeu de cette partie était de s'interroger sur la capacité des *affordances* dimensionnées à l'action à permettre non seulement la sélection d'un mode d'action mais aussi le contrôle en ligne de l'action, en s'appuyant sur des propriétés cinématiques.

- D'après Fajen (2007a), les individus se meuvent dans un environnement de sorte à maintenir un état « idéal » dans une région dite sécurisée délimitée par leurs limites d'action.

- Comme nous l'avons montré à travers différentes études, une *affordance* dimensionnée à l'action parvient à rendre compte de la sélection et du contrôle de l'action d'un individu dans une grande diversité de comportements (e.g. freinage, passage d'ouverture de porte, interception d'objets) en considérant les limites d'action individuelles définies par des propriétés cinématiques (e.g. vitesse de marche maximale, décélération maximale d'un véhicule, etc.).

I.2.2 Le dépassement automobile : analyse des mécanismes perceptivo-moteurs à travers le prisme écologique

Contrairement aux précédentes recherches (cf pp.8-13) qui ont étudié la prise de décision et la réalisation du dépassement automobile de façon « modulaire » – i.e., avec une conception séquentialisée de l'action – et non holistique du comportement, il convient d'analyser la tâche de dépassement et les mécanismes perceptivo-moteurs en jeu à travers le prisme de la théorie des *affordances*. Comment cette théorie peut-elle rendre compte du comportement de dépassement automobile ? Comment formaliser les propriétés du système agent-environnement ainsi que les propriétés de l'agent ? À travers un même scénario de dépassement, nous proposerons et analyserons différentes propriétés d'intérêt à considérer dans la formalisation d'une *affordance*, sous-jacentes aux processus d'initiation et de

réalisation d'un dépassement. L'ensemble des situations automobiles présentées ci-après, serviront de véritable fil de conducteur aux chapitres expérimentaux.

Pour ce faire, il convient tout d'abord de définir des situations automobiles relativement simplifiées, en figeant certains degrés de liberté tels que la circulation de véhicules en sens inverse, afin de nous assurer de la pertinence des propriétés modélisées dans la prise de décision du conducteur et la réalisation du dépassement. Dans un premier temps, nous proposerons de formaliser des propriétés d'intérêt liées à la vitesse du véhicule conduit. Ces propriétés d'ordre cinématique sont suffisamment macroscopiques pour vérifier la sensibilité des conducteurs aux *affordances* ainsi formalisées. Dans un deuxième temps, nous proposerons d'enrichir les propriétés d'intérêt précédemment formalisées par de nouvelles propriétés, moins macroscopiques, liées à l'accélération du véhicule conduit, censées rendre compte plus fidèlement des propriétés en jeu lors du dépassement. Enfin, dans un dernier temps et en nous rapprochant davantage du réalisme du dépassement, nous formaliserons des propriétés d'intérêt, caractérisées par les capacités d'accélération propres au rapport de vitesse du véhicule conduit. Nous interrogerons, de ce fait, la capacité des individus à avoir accès à des capacités d'accélération distinctes pour sélectionner et réguler leur dépassement automobile.

I.2.2.1 Dépassement et affordance MSV/Vmax

Imaginons une situation de dépassement automobile (Figure 15), sur route nationale à deux voies de circulation, dans laquelle trois véhicules sont impliqués : un véhicule conduit par un conducteur désireux de dépasser, un véhicule roulant devant ce conducteur sur la même voie et enfin un véhicule présent en sens inverse, immobile, à éviter durant le dépassement.

À l'instar de Warren (1984) et de Fajen (2005b), nous exprimons une *affordance* de dépassement comme le ratio entre une propriété du système agent-environnement – i.e., un état idéal – et une propriété de l'agent. Dans cette situation (Figure 15), nous formalisons la propriété du système agent-environnement ou état idéal en termes de propriétés cinématiques dépendantes de la vitesse minimale satisfaisante pour réussir le dépassement (*Minimal Satisfying Velocity*, *MSV*). La formalisation de *MSV* inclura la distance restant à parcourir par le conducteur jusqu'au véhicule obstacle (Distance sujet, D_S), la distance restant à parcourir

par le véhicule *leader* (Distance *leader*, D_L) ainsi que la position du véhicule obstacle considéré comme immobile (V_O) dans cette première phase de nos recherches. Par ailleurs, la vitesse du véhicule leader (V_L) sera également à prendre en compte. Nous pouvons ainsi formaliser *MSV* comme suit :

$$MSV = \frac{Distance_{Sujet} \times Véhicule_{Leader}}{Distance_{Leader}}$$

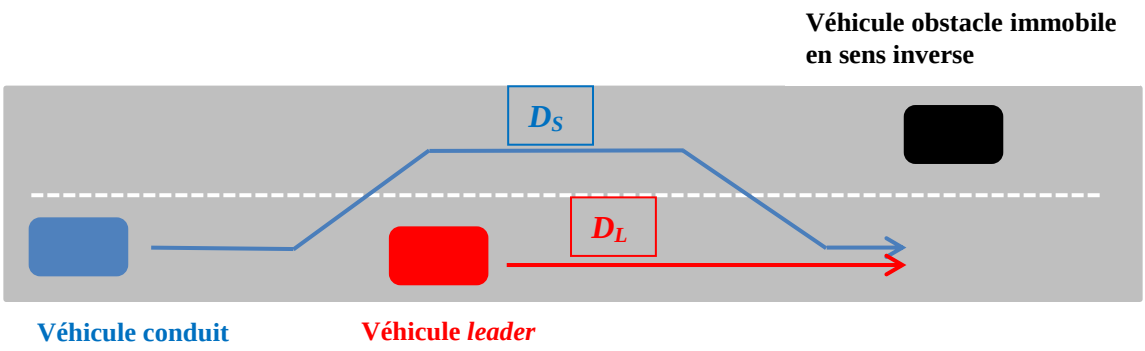


Figure 15 : Représentation schématique d'une situation de dépassement automobile classique

Afin d'exprimer notre *affordance* de dépassement il convient également de formaliser la propriété de l'agent reflétant la limite d'action du véhicule. Cette dernière représente les capacités d'action du conducteur définies en termes de propriétés cinématiques dépendantes de la vitesse maximale du véhicule conduit (*Vmax*). À l'image de la formalisation mathématique de Warren (1984), nous exprimons l'*affordance* de dépassement (π_1) comme le ratio entre une propriété du système agent-environnement – i.e., état idéal – (*MSV*) et une propriété de l'agent (*Vmax*) :

$$\pi_1 = \frac{MSV}{Vmax}$$

En postulant que le conducteur perçoit l'*affordance* de dépassement (π_1) pour prendre la décision d'initier son dépassement, nous devrions observer une série de comportements (Figure 16), fonctions des valeurs de π_1 :

- Si $\pi_1 > 1$, c'est-à-dire si *MSV* > *Vmax*, le conducteur ne devrait pas initier de dépassement. En effet, dans cette situation, la vitesse minimale à atteindre pour réussir

le dépassement (*MSV*) est supérieure à la vitesse maximale du véhicule conduit (*Vmax*). Le conducteur n'est donc pas en mesure de réussir son dépassement.

- Si $\pi_1 < 1$, c'est-à-dire si *MSV* < *Vmax*, le conducteur devrait initier son dépassement. En effet, dans cette situation, la vitesse minimale à atteindre pour réussir le dépassement (*MSV*) est inférieure à la vitesse maximale du véhicule conduit (*Vmax*). Le conducteur est donc en mesure de réussir son dépassement.

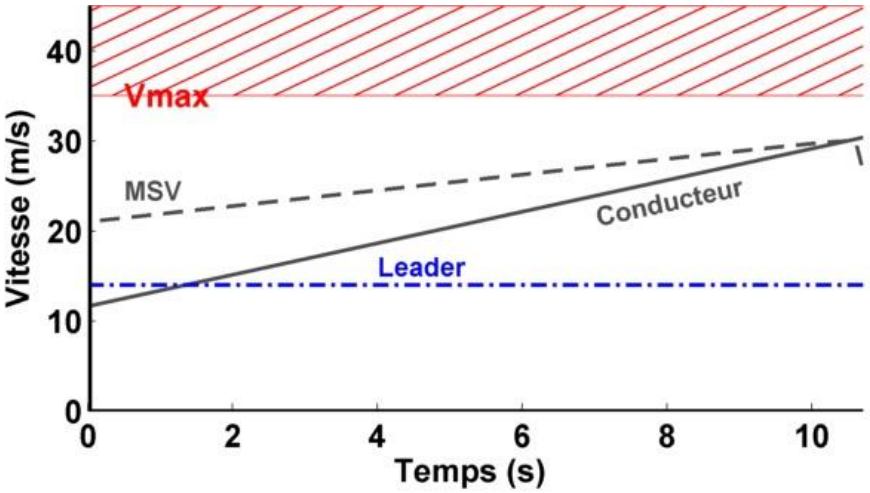


Figure 16: Représentation schématique des propriétés du système agent-environnement ou état idéal (*MSV*) et des capacités d'action du conducteur (*Vmax* et « Conducteur »). L'évolution de *MSV* dépend de l'évolution de la vitesse du conducteur. Tant que la *MSV* est inférieure à la *Vmax* alors le dépassement est possible. La vitesse du véhicule leader (« Leader ») reste constante.

Dans ce scénario de dépassement automobile, nous avons formalisé une première *affordance* de dépassement susceptible d'être perçue par le conducteur, au sein de laquelle la propriété du système agent-environnement – état idéal – était représentée par la vitesse minimale satisfaisante (*MSV*) pour réussir le dépassement et la propriété de l'agent par la vitesse maximale du véhicule conduit (*Vmax*).

Toutefois, si la perception de cette *affordance* est une condition nécessaire pour réussir le dépassement, elle n'est pas pour autant suffisante. En effet, dans une situation où la *MSV* serait très éloignée de la vitesse courante du conducteur tout en étant inférieure à sa *Vmax*, une telle propriété du système agent-environnement ne renseignerait pas le conducteur sur sa capacité à fournir une accélération suffisante pour rejoindre la *MSV* avant qu'elle ne dépasse la *Vmax*. La *MSV* informerait le conducteur, à tort, de la faisabilité du dépassement. Pour

autant, ceci n'implique pas l'inutilité de cette *affordance* pour le conducteur mais bien plus la présence d'autres propriétés d'intérêt à considérer pour ce type de situation automobile. Il convient dès lors de formaliser une *affordance* de dépassement relative à l'accélération du véhicule conduit.

I.2.2.2 Dépassement et affordances MSV/Vmax et MSA/Amax

Si nous reprenons la situation de dépassement présentée précédemment, dans la vie réelle les véhicules ne sont pas seulement bornés par une vitesse maximale mais également par une accélération maximale qui contraint leur performance. Les conducteurs pourraient alors améliorer leur perception des possibilités de dépasser en s'appuyant non seulement sur la vitesse maximale, mais également sur leur accélération maximale.

Dans le prolongement des études de Warren (1984) et de Fajen (2005b), nous pouvons formaliser une deuxième *affordance* à partir d'une propriété du système agent-environnement – i.e., d'un état idéal – dépendant d'une accélération minimale satisfaisante (*Minimal Satisfying Acceleration*, *MSA*) pour réussir le dépassement. Dans cette situation (Figure 17), une formalisation de *MSA* inclut la vitesse maximale du véhicule sujet (*Vmax*), la vitesse courante du véhicule sujet (*Vs*) ainsi que la vitesse du véhicule leader à dépasser (V_L). Par ailleurs, la formalisation de *MSA* intègre les propriétés relatives à la distance restant à parcourir par le conducteur jusqu'au véhicule obstacle (Distance sujet, D_S), la distance restant à parcourir par le véhicule *leader* (Distance *leader*, D_L) ainsi que la position du véhicule obstacle considérée comme immobile (V_O). Nous pouvons ainsi formaliser *MSA* comme suit :

$$MSA = \frac{-\left(V_{max} - Vitesse_{Sujet}\right)^2}{2 \times \left(Distance_{\ Sujet} - V_{max} \times \frac{Distance_{Leader}}{Vitesse_{Leader}}\right)}$$

Afin d'exprimer notre deuxième *affordance* de dépassement il convient de formaliser les limites d'action de l'agent. Ces dernières représentent les capacités d'action maximale du conducteur définies en termes de cinématiques. Dans cette situation de dépassement, l'accélération maximale du conducteur (*Amax*) est définie comme une capacité d'action maximale. À l'image de Warren (1984), nous exprimons l'*affordance* de dépassement (π_2)

susceptible d'être perçue comme le ratio entre une propriété du système agent-environnement – état idéal – (*MSA*) et une propriété de l'agent (*Amax*) :

$$\pi_2 = \frac{MSA}{Amax}$$

L'intérêt de formaliser une nouvelle *affordance* dans ce deuxième scénario réside dans la possibilité de comparer le degré d'utilisation de chacune des *affordances* par le conducteur lors d'une situation de dépassement. Le conducteur dispose dans ce scénario de deux *affordances* de dépassement dont l'une, par construction, l'informe plus précisément et plus précocement sur ses possibilités d'action (Figure 17). En effet, l'accélération étant la primitive de la vitesse, elle renseignera plus précisément et plus rapidement le conducteur sur les propriétés du système agent-environnement (contraintes spatio-temporelles de la tâche) ainsi que sur ses capacités d'action maximales. Percevoir l'*affordance MSA*/*Amax* est une condition nécessaire et suffisante pour réussir le dépassement contrairement à l'*affordance MSV*/*Vmax* (Figure 17). Pour autant, cela n'implique pas l'inutilité de cette *affordance* dans l'initiation et la réalisation du dépassement. Cette nouvelle formalisation devrait enrichir la précédente en renseignant plus précisément les conducteurs sur leurs possibilités de dépasser. Si le conducteur perçoit préférentiellement l'*affordance* (*MSA/Amax*), alors nous devrions observer :

- Si *MSA/Amax* > 1 et *MSV/Vmax* < 1, le conducteur ne devrait pas initier de dépassement. En effet, dans cette situation l'accélération minimale à atteindre pour réussir le dépassement (*MSA*) est supérieure à l'accélération maximale du véhicule conduit (*Amax*). Le conducteur n'est donc pas en mesure de réussir son dépassement malgré une condition dans laquelle *MSV* est inférieure à *Vmax*.

- Si *MSA/Amax* < 1 et *MSV/Vmax* < 1, le conducteur devrait initier son dépassement. En effet, dans cette situation l'accélération minimale à atteindre pour réussir le dépassement (*MSA*) est inférieure à l'accélération maximale du véhicule sujet (*Amax*). Le conducteur est donc en mesure de réussir son dépassement.

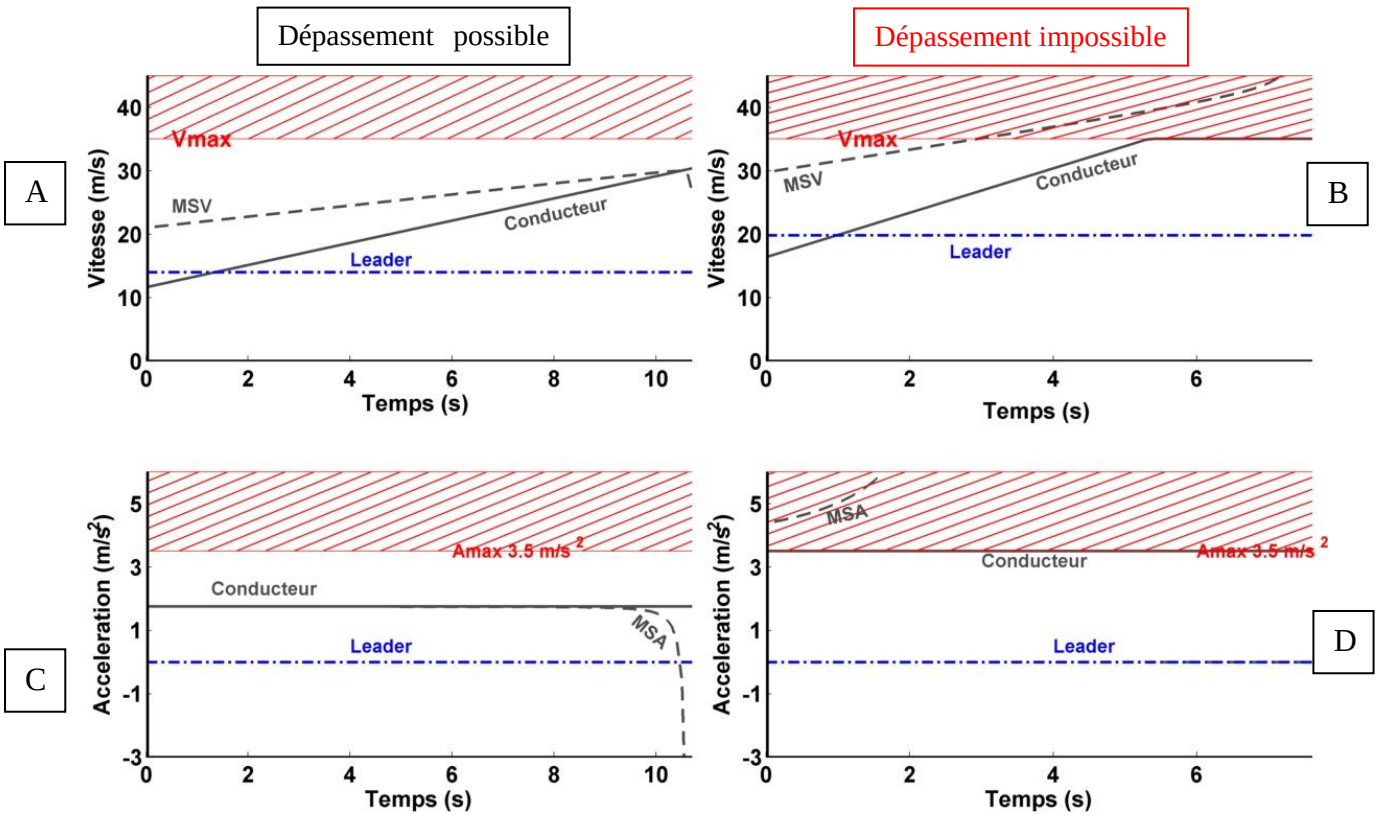


Figure 17: Représentation schématique des propriétés du système agent-environnement (*MSV et MSA*) et des propriétés de l'agent (*Vmax* et *Amax* ; Vitesse et Accélération du conducteur « Conducteur ») lors d'un dépassement, selon deux propriétés cinématiques : la vitesse (panneau A et B) et l'accélération (panneau C et D). Le panneau A est associé au panneau C tandis que le panneau B est associé au panneau D. Si l'on considère uniquement les panneaux A et C, *MSV* et *MSA* informent le conducteur d'un dépassement possible. Si l'on considère à présent les panneaux B et D, alors que la *MSV* informe le conducteur d'un dépassement possible jusqu'à la 3ème seconde, la *MSA* informe le conducteur de l'impossibilité de dépasser, dès les premières secondes : l'accélération maximale du conducteur (*Amax*) est inférieure à la *MSA* (D). Le conducteur ne peut fournir une accélération suffisante qui lui permette de rejoindre la *MSV* avant qu'elle n'atteigne *Vmax* : le dépassement est donc impossible.

Dans ce scénario de dépassement automobile, nous avons formalisé une deuxième *affordance* de dépassement susceptible d'être perçue par le conducteur, caractérisée par une propriété du système agent-environnement – i.e., un état idéal – représentée par l'accélération minimale satisfaisante (*MSA*) pour réussir le dépassement et pour laquelle la propriété de l'agent était représentée par l'accélération maximale du véhicule conduit (*Amax*).

Il convient à présent d'aborder la formalisation de nouvelles propriétés du système agent-environnement et des propriétés de l'agent. Dans ce nouveau scénario, le conducteur aura la possibilité de moduler ses capacités d'accélération maximales.

I.2.2.3 Dépassement et affordance MSA/Amax 3ème et MSA/Amax 4ème

Si nous reprenons la situation de dépassement présentée dans la partie précédente, les véhicules étaient bridés à la fois par une vitesse maximale mais également par une accélération maximale qui contraignaient leur performance. Toutefois, dans les situations automobiles quotidiennes, le conducteur dispose d'un ensemble d'accélérations qu'il peut sélectionner en modifiant les rapports de vitesse de son véhicule. Dans cette perspective, nous nous proposons de questionner la capacité des conducteurs, lors de la réalisation d'un même dépassement, à exploiter des limites d'action distinctes (en termes d'accélération maximale) propres à chaque rapport de vitesse

Dans un souci de réalisme nous avons sélectionné deux rapports de vitesse susceptibles d'être les plus utilisés lors d'une situation de dépassement. Dans le prolongement de l'étude de Warren (1984) et de Fajen (2005a, 2005c), nous formalisons une *affordance* relative, par exemple, au quatrième et au troisième rapport de vitesse. La propriété du système agent-environnement – i.e., l'état idéal – dans cette situation est définie par l'accélération minimale satisfaisante (*Minimal Satisfying Acceleration*, *MSA*) pour réussir le dépassement. La formalisation de *MSA*, reste inchangée par rapport au scénario précédent.

Afin de formaliser notre *affordance* de dépassement, il convient à présent de définir les deux propriétés de l'agent. Ces dernières représentent les capacités d'action du conducteur en 3ème et en 4ème vitesse, définies en termes de propriétés cinématiques (i.e., par une accélération maximale) et notées respectivement *Amax 3ème* et *Amax 4ème*. Rappelons en outre qu'une accélération en 3ème vitesse sera plus grande qu'une accélération en 4ème vitesse pour un véhicule donné. En effet, comme le montre le graphique ci-dessous (Figure 18), chaque rapport de vitesse possède une capacité d'accélération maximale changeante lors de chaque rétrogradation ou lors d'un passage au rapport de vitesse supérieur. La capacité d'accélération diminue à mesure que le rapport de vitesse augmente. Ainsi, un rapport en 1ère vitesse possèdera une plus grande accélération maximale qu'un rapport en 4ème. Le dépassement automobile apparaît alors comme un cas d'usage particulièrement intéressant : la vitesse n'est plus la seule variable à considérer, il est nécessaire d'intégrer également le rapport de vitesse (accélération disponible) pour initier son dépassement.

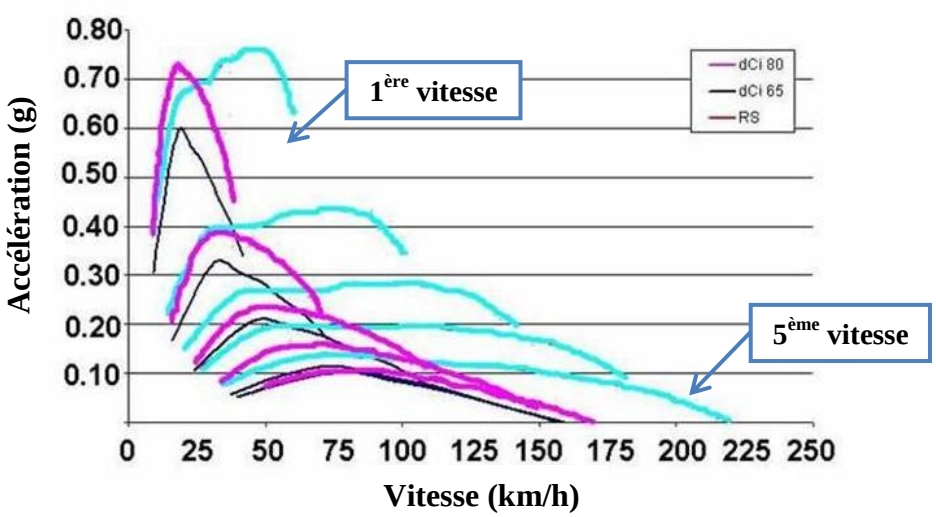


Figure 18: Accélération (en g) relative aux cinq rapports de vitesse et exprimée en fonction de la vitesse courante, en km/h, de trois types de véhicule dCi80 (courbe magenta), dCi65 (courbe noir) et RS (courbe bleu) se distinguant par leurs capacités d'accélération. Le véhicule type RS (courbe bleu) possède les plus grandes capacités d'accélération.

À l'image de Warren (1984) et Fajen (2005a, 2005c), nous exprimons l'*affordance* de dépassement en 3ème (π_3) et en 4ème vitesse (π_4) comme le ratio entre une propriété du système agent-environnement (*MSA*) – état idéal – et une propriété de l'agent (*Amax* 3ème et *Amax* 4ème) :

$$\pi_3 = \frac{MSA}{Amax\ 3^{ème}} \quad \text{et} \quad \pi_4 = \frac{MSA}{Amax\ 4^{ème}}$$

L'intérêt de formaliser une *affordance* de dépassement dont les capacités d'action maximales peuvent être modulées, réside dans la possibilité de mesurer la capacité du conducteur à utiliser plusieurs limites d'action au moment de l'initiation de son dépassement et tout au long de sa réalisation comme référence. En effet, si le conducteur décide de rétrograder de la 4ème à la 3ème vitesse cela signifie qu'il perçoit l'accélération fournie en 4ème comme insuffisante par rapport à ses capacités d'action pour réussir le dépassement. Le comportement de rétrogradation nous permettra, en ce sens, de mieux décrire les mécanismes perceptivo-moteurs mis en œuvre, au quotidien, lorsque le conducteur est amené à changer de véhicule ou encore à se calibrer aux nouvelles accélérations fournies par chacun de ses rapports de vitesse.

Si le conducteur est sensible aux limites d'action définies en termes d'accélération, nous devrions observer (Figure 19) :

- Si *MSA/Amax* 4ème < 1 et *MSA/Amax 3ème* < 1, le conducteur devrait initier et réaliser son dépassement sans effectuer de rétrogradation – en considérant que le conducteur débute son essai en 4ème. En effet, dans cette situation, l'accélération minimale à atteindre pour réussir le dépassement (*MSA*) est inférieure à l'accélération maximale du véhicule sujet en 4ème vitesse (*Amax* 4ème). Il n'est donc pas nécessaire de rétrograder en 3ème vitesse pour réussir le dépassement.

- Si *MSA/Amax* 4ème > 1 et *MSA/Amax 3ème* < 1, le conducteur devrait initier et réaliser son dépassement après avoir rétrogradé en 3ème vitesse. En effet, dans cette situation, l'accélération minimale à atteindre pour réussir le dépassement (*MSA*) est supérieure à l'accélération maximale du véhicule sujet en 4ème vitesse (*Amax* 4ème) mais reste inférieure à l'accélération maximale du véhicule sujet en 3ème vitesse (*Amax* 3ème). Le conducteur doit donc utiliser une capacité d'action plus grande pour réussir le dépassement.

- Si *MSA/Amax 3ème* > 1, le conducteur ne devrait pas initier de dépassement. En effet, dans cette situation, l'accélération minimale à atteindre pour réussir le dépassement (*MSA*) est supérieure à l'accélération maximale du véhicule conduit (*Amax 3ème*), i.e., sa plus grande capacité d'accélération. Le conducteur n'est donc pas en mesure de réussir son dépassement.

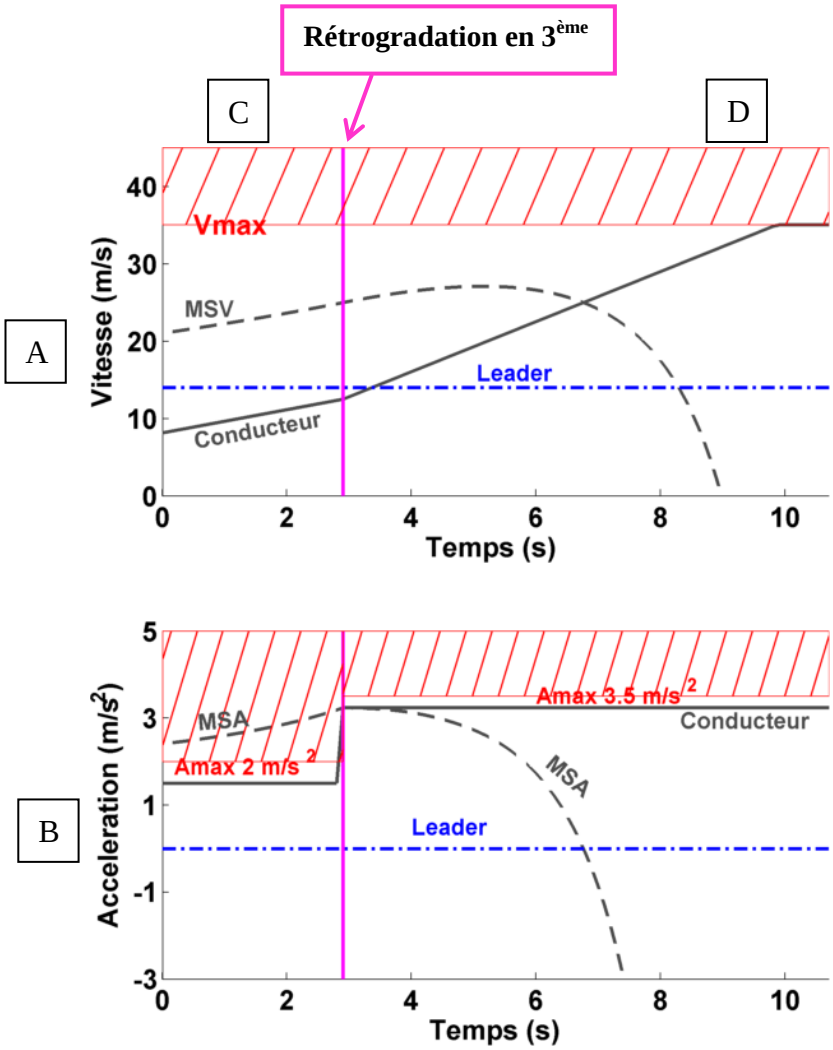


Figure 19: Représentation schématique des propriétés du système agent-environnement (*MSV et MSA*) et des propriétés de l'agent (*Vmax, Amax 4ème et Amax 3ème* ; Vitesse et Accélération courante) lors d'un dépassement, selon deux propriétés cinématiques : la vitesse (panneau A) et l'accélération (panneau B). Dans cette situation le conducteur dispose de deux capacités d'accélération *(Amax 2m/s²* et *Amax 3.5m/s²*). Durant la première phase de l'essai (panneau C), *MSA* est supérieure à l'accélération maximale du conducteur en 4ème (*Amax 2m/s²)* mais inférieure à l'*Amax 3.5 m/s²* : le dépassement est impossible si le conducteur reste en 4ème. Il est donc nécessaire de rétrograder en 3ème vitesse (panneau D) avant que la *MSA* ne dépasse la limite d'action en 3ème vitesse (*Amax 3.5m/s²*). L'accélération maximale du conducteur devient alors supérieure à la *MSA*: le dépassement devient possible.

Dans ce scénario de dépassement automobile, nous avons formalisé une nouvelle *affordance* de dépassement susceptible d'être perçue par le conducteur, caractérisée par une propriété du système agent-environnement représentée par l'accélération minimale satisfaisante (*MSA*) pour réussir le dépassement et pour lesquelles les propriétés de l'agent étaient représentées par l'accélération maximale du véhicule conduit en 3ème (*Amax 3ème*) et en 4ème vitesse (*Amax 4ème*). Nous nous intéresserons ainsi à la sélection et à la régulation d'un

mode d'action en questionnant la capacité des conducteurs, lors de la réalisation d'un même dépassement, à exploiter des limites d'action distinctes propres à chaque rapport de vitesse.

Fort de ce constat, nous allons présenter l'objectif général de ce travail de thèse abordant les comportements de prise de décision lors d'un dépassement automobile et les comportements de régulation du dépassement en s'inspirant de ces trois scénarios de dépassement. Le cœur de ma problématique consiste à vérifier si la théorie des *affordances*, à travers des *affordances* dimensionnées à l'action, peut s'appliquer à une tâche de dépassement automobile.

RÉSUMÉ :

En nous appuyant sur le cadre théorique des *affordances* présenté précédemment (cf. p. 17 et suiv.), nous avons pu formaliser des *affordances* susceptibles d'être perçues par un conducteur à partir de la prise en compte de différentes propriétés du système agent-environnement et des propriétés de l'agent, et ce pour une même situation de dépassement automobile.

I.2.3 Problématique et objectifs

Nous avons précédemment mis en évidence que le dépassement automobile est une activité perceptivo-motrice dont la réussite dépendrait de la prise en compte de propriétés physiques/géométriques (e.g., espace inter-véhiculaire) du dépassement et sociodémographiques (e.g., âge des conducteurs) notamment, comme en témoigne l'ensemble des bilans accidentologiques. Nous avons également signalé les limites des recherches menées jusqu'à présent, du fait de l'absence ou de la mauvaise prise en compte des propriétés d'intérêt dans la réalisation du dépassement automobile (e.g., capacité d'action des conducteurs), faute de cadre théorique adéquat.

Fort de ce constat, nous avons suggéré que la théorie écologique de la perception et de l'action, et plus particulièrement son concept central d'*affordance*, serait une alternative

théorique utile pour l'étude du dépassement automobile. Nous avons montré que les individus, quels que soient les tâches dans lesquelles ils sont impliqués (e.g., intercepter un objet, monter des marches, passer sous une barrière, attraper une balle en vol, freiner pour éviter des obstacles, etc.), s'appuient sur la perception de leurs possibilités d'action – i.e., des *affordances* dimensionnées à l'action et/ou aux propriétés anthropométriques – pour prendre leurs décisions et contrôler leurs actions. La théorie des *affordances* apparaît ainsi particulièrement pertinente dans l'étude du dépassement automobile.

Originellement conceptualisée par J. J. Gibson (1966, 1977, 1986) et formalisée par Warren (1984), la théorie des *affordances* a été repensée par Fajen (2007a) afin de répondre aux problématiques des liens entre capacités d'action et contrôle de l'action. À travers l'*affordance-based control*, Fajen a pu expliquer des comportements de prise de décision et de contrôle de l'action, dans une tâche de freinage, par la modélisation des propriétés du système agent-environnement spécifiant les possibilités de freiner du véhicule (e.g., décélération idéale / décélération maximale, etc.).

Dans la même veine, nous souhaitons déterminer si le dépassement automobile peut également être appréhendé à travers la perception d'*affordances* dimensionnées à l'action, définies en termes de possibilités d'action. À la différence de Fajen, nous nous focaliserons uniquement, dans ce manuscrit, sur les propriétés du système agent-environnement sous-jacentes au dépassement et non sur le support optique les spécifiant.

L'objectif principal de ce travail de thèse est de valider l'hypothèse générale selon laquelle les conducteurs automobiles sélectionnent un mode d'action (i.e., prennent la décision de dépasser ou non) et le régulent (i.e., contrôlent leur dépassement automobile) en percevant des possibilités de dépassement, appelées *affordances.* Ces dernières seraient définies par le ratio entre les propriétés du système agent-environnement (e.g., vitesse minimale satisfaisante pour réussir le dépassement) et les propriétés de l'agent (e.g., vitesse maximale du véhicule conduit). Il s'agit ainsi, à partir du formalisme mathématique de l'*affordance* élaboré par Warren (1984) et de la nouvelle conceptualisation de l'*affordance* réalisée par Fajen (2007a), de mettre la théorie des *affordances* à l'épreuve du dépassement automobile à travers trois expérimentations réalisées sur simulateur de conduite.

Dans une première expérience (Étude 1), nous nous concentrerons sur le comportement de sélection d'un mode d'action du conducteur à l'origine de la réussite du dépassement automobile. Nous formulons l'hypothèse que les conducteurs automobiles

prennent la décision d'initier un dépassement en fonction d'une *affordance* dimensionnée à l'action, définie par le ratio entre les propriétés du système agent-environnement (i.e., la Vitesse Minimale Satisfaisante pour réussir un dépassement, *MSV*) et les propriétés de l'agent (i.e., la Vitesse maximale du véhicule conduit, *Vmax*). En reprenant la formalisation de Warren (1984), nous exprimons l'*affordance* de dépassement telle que : $\pi_1 = MSV/Vmax$. D'après notre hypothèse, nous devrions observer une majorité de dépassements pour les conditions expérimentales dans lesquelles $MSV/Vmax < 1$. Dans cette situation en effet, la vitesse minimale pour réussir un dépassement est inférieure à la vitesse maximale du véhicule conduit : le dépassement est donc réalisable en toute sécurité. À l'inverse, nous devrions observer une absence de dépassement ou encore des dépassements interrompus (i.e., renoncement) pour des conditions expérimentales dans lesquelles $MSV/Vmax > 1$.

Dans une deuxième expérience (Étude 2), nous nous interrogerons sur l'utilisation préférentielle d'une seconde *affordance* du dépassement automobile – formalisée à partir de propriétés définies dans une unité d'accélération – à même de spécifier plus précisément et plus précocement les possibilités de dépasser. Pour ce faire, nous étudierons en grande partie le comportement de sélection d'un mode d'action en manipulant les valeurs de deux *affordances* (*MSV/Vmax* et *MSA/Amax*). Nous nous intéresserons également à la capacité des sujets à réguler leurs modes d'action (e.g., doubler, renoncer, etc.) à partir de cette nouvelle *affordance* de haut niveau. Nous faisons l'hypothèse que les conducteurs automobiles prennent la décision d'initier un dépassement en fonction de cette nouvelle *affordance* définie par le ratio entre les propriétés du système agent-environnement (i.e., l'Accélération Minimale Satisfaisante pour réussir un dépassement, *MSA*) et les propriétés de l'agent (i.e., l'Accélération maximale du véhicule conduit, *Amax*).

Comme lors de la première expérience, nous exprimons l'*affordance* de dépassement telle que : $\pi_2 = MSA/Amax$. Nous devrions observer une majorité de dépassements pour les conditions expérimentales dans lesquelles $MSA/Amax < 1$ et $MSV/Vmax < 1$. Dans cette situation, en effet, l'accélération et la vitesse minimales pour réussir le dépassement sont inférieures à l'accélération et à la vitesse maximale du véhicule conduit : le dépassement est donc réalisable en toute sécurité. Toutefois, dès l'instant que le ratio $MSA/Amax > 1$, nous devrions observer une absence de dépassements ou encore des dépassements interrompus (i.e., un renoncement) malgré des conditions expérimentales pour lesquelles $MSV/Vmax < 1$.

Dans une troisième expérience (Étude 3), nous nous intéresserons à la sélection et à la régulation d'un mode d'action en questionnant la capacité des conducteurs, lors de la réalisation d'un même dépassement, à exploiter des limites d'action distinctes propres à chaque rapport de vitesse. Le choix sera donné au conducteur de changer les capacités d'action de leur véhicule en fonction de l'évolution des propriétés du système agent-environnement (contraintes spatio-temporelles du dépassement). Pour ce faire, nous permettrons aux conducteurs de réguler leurs accélérations au cours d'un essai, en redéfinissant leurs capacités d'action maximales (i.e., leurs accélérations maximales en 4ème et en 3ème) à l'aide d'une boîte de vitesse manuelle. Nous faisons l'hypothèse que les conducteurs sont capables d'initier un dépassement et de le réguler en se calibrant à une *affordance* définie par le ratio entre des propriétés du système agent-environnement (i.e., l'Accélération Minimale Satisfaisante pour réussir un dépassement, *MSA*) et des propriétés de l'agent (i.e., l'Accélération maximale du véhicule conduit en 4ème ou en 3ème (*Amax 4ème* ou *Amax 3ème)*.

En cohérence avec les précédentes études, nous exprimons l'*affordance* de dépassement telle que : π_3 = *MSA/Amax 3ème* et π_4 = *MSA/Amax 4ème*. Si notre hypothèse est vérifiée, nous devrions observer une majorité de dépassements pour les conditions expérimentales dans lesquelles *MSA/Amax 4ème* et *MSA/Amax 3ème* < 1. Par ailleurs, si les conducteurs sont correctement calibrés à leurs capacités d'accélération (*Amax 4ème* et *3ème*), ils devraient choisir de rétrograder en 3ème vitesse lorsque la condition expérimentale correspond à *MSA/Amax 4ème* > 1 et *MSA/Amax 3ème* < 1. Dans cette situation, en effet, l'accélération minimale pour réussir le dépassement est supérieure à l'accélération maximale en 4ème du véhicule conduit mais reste inférieure à l'accélération maximale en 3ème: le dépassement est donc réalisable en toute sécurité. Toutefois, dès l'instant que le ratio *MSA/Amax 3ème* > 1, nous devrions observer une absence de dépassements ou encore des dépassements interrompus (i.e., un renoncement).

Dans l'ensemble de ces études, à l'instar de Warren (1984) et de Fajen (2005a, 2005c, 2007b), nous devrions observer des fréquences de dépassements distinctes entre les groupes de conducteurs possédant des capacités d'action différentes, lorsque ces fréquences seront exprimées dans une échelle de mesure extrinsèque (unité absolue, en m/s). Les conducteurs possédant de plus grandes capacités d'action devraient davantage doubler. En revanche, dès lors que les fréquences de dépassements seront exprimées dans une échelle de mesure

intrinsèque (unité relative, en %), alors nous devrions observer une superposition des fréquences de dépassements entre les groupes de conducteurs.

II. Méthodologie générale

II.1 Le simulateur de conduite : une validité écologique expérimentale

II.1.1 La réalité virtuelle

Les trois expérimentations présentées dans ce travail ont eu recours à l'utilisation de la réalité virtuelle par le biais d'un simulateur de conduite à base fixe. Bien que n'ayant pas eu connaissance d'une telle technologie, J. J. Gibson (1986) insistait déjà sur la nécessité d'« amener le monde réel dans le laboratoire ». Par ailleurs, comme le précisent de très nombreux spécialistes de la réalité virtuelle (CRTRV, 2004; Fuchs, 1996) : « *la finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel*». Cette technologie et les finalités qui lui sont associées sont donc en totale adéquation avec la conception écologique à laquelle nous souhaitons nous référer dans la tâche de dépassement automobile.

En outre, la réalité virtuelle présente de nombreux avantages dans l'étude des comportements perceptivo-moteurs tels que la simulation de certains aspects du monde réel (e.g., prise de décision dans un temps limité) ou encore la simulation de comportements automobiles sans danger physique pour le conducteur. Par ailleurs, l'analyse des comportements automobiles « en-ligne » permet à l'expérimentateur d'identifier plus précisément les comportements perceptivo-moteurs mis en œuvre. La réalité virtuelle permet également de créer et de manipuler de nombreuses propriétés environnementales (e.g., texture de route, vitesse des véhicules, densité du trafic routier, etc.) ainsi que de reproduire les scénarios élaborés.

L'utilisation de la réalité virtuelle dans le domaine des sciences du comportement permet ainsi de faire coexister la validité écologique d'une étude en laboratoire et le contrôle expérimental nécessaire à l'étude objective d'un comportement perceptivo-moteur (Loomis, Blascovich, & Beall, 1999; Mestre, 2006). En d'autres termes, le participant est en mesure de contrôler et de transformer activement par son action l'information contenue dans l'environnement virtuel. Conformément à notre cadre conceptuel, les déterminants

perceptivo-moteurs du dépassement automobile pourront être étudiés à travers une perception active des participants.

Les nombreuses études attestant la validité de la réalité virtuelle dans l'observation des comportements dits « naturels » n'ont pas empêché de vifs débats concernant la pertinence d'une telle technique dans l'observation des comportements humains (Alicandri, 1994; Desmond & Matthews, 1997; Ellingrod et al., 1997; Fraser, Hawken, & Warnes, 1994; Mestre, 2006; Tarr & Warren, 2002; Underwood, Crundall, & Chapman, 2011; Van Winsum & Brouwer, 1997; Van Winsum & Godthelp, 1996).

II.1.2 Le simulateur de conduite

La Figure 20 ci-dessous représente une vue d'ensemble du simulateur de conduite (Panneau A) et de la scène virtuelle diffusée aux participants (Panneau B) dans les quatre expériences présentées ultérieurement. Les participants prennent place dans un siège de conduite (Mobsim, France) et manipulent deux pédales (Trackstar 6000 GTS) avec leur pied droit permettant l'accélération et le freinage. Ils conduisent un véhicule virtuel standard (ECCI, Trackstar 6000 GTS). Les participants peuvent augmenter leur vitesse courante en appuyant sur l'accélérateur à partir de sa position initiale et freiner en appuyant sur la pédale de frein. Une particularité est introduite dans la troisième expérience: les participants peuvent manipuler l'accélération maximale de leur véhicule à l'aide d'un levier de vitesse (ECCI, Trackstar 6000 GTS). L'utilisation de deux rapports de vitesse est alors autorisée : une 3ème et une 4ème vitesse.

Pour atteindre une vitesse, une accélération ou encore un freinage maximal, les conducteurs doivent appuyer sur la pédale associée de façon à se trouver « pied au plancher ». Les valeurs de vitesse, accélération et freinage courantes sont quant à elles liées à la position de la pédale associée, de la position totalement relâchée à la position « pied au plancher ». Le volant agit comme un interrupteur : les participants contrôlent seulement leurs mouvements de la gauche vers la droite en tournant le volant de façon à dépasser un seuil d'activation préprogrammé de ± 30°. Deux boutons localisés sur le côté gauche et sur le côté droit du volant ainsi qu'un bouton central affichent brièvement – à la demande du conducteur – les rétroviseurs de côtés et le rétroviseur central.

Une scène virtuelle est diffusée en ligne à l'aide d'un logiciel de réalité virtuelle propre au laboratoire (*ICE*) exécuté sur un ordinateur durant l'expérimentation (*Microsoft® Windows® XP Pro® SP2*, *Intel® Pentium®* 4@3.2 *GHz CPU*, 3.5 G0 de *RAM*, *Nvidia GeForce* 6600 GT). Pour ce faire, le logiciel intègre un signal USB généré par les mouvements de pédales et de volant. La scène virtuelle est projetée dans un casque de réalité virtuelle 3D (*Hi-res 900 stéréo*) avec une fréquence de rafraîchissement de 75Hz et une résolution de 800×600 pixels. Ce casque de réalité virtuelle fournit un champ de vision de 31.2° diagonale pour chaque œil. Un système électromagnétique de suivi des rotations céphaliques (6 DDL, *Flock of Birds*) lie le point de vue dans le monde virtuel aux rotations céphaliques du conducteur, tout en conservant un point fixe d'observation (0.975m au-dessus du sol) au centre du siège conducteur.

A **B**

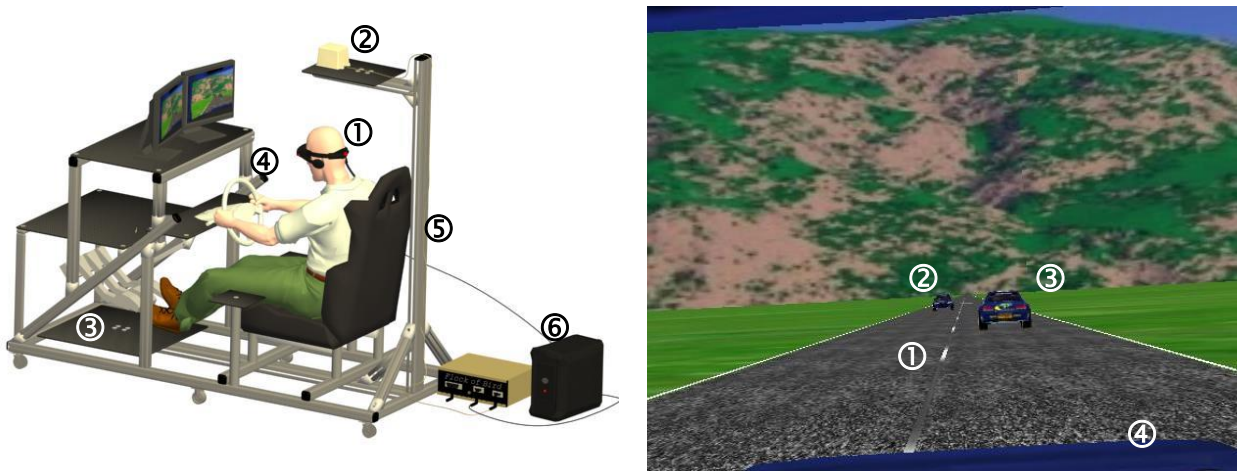


Figure 20 : (A) Le dispositif de réalité virtuelle et ses composants comprennent (1) un casque de réalité virtuelle (Hi res 900 stereo, Cybermind corp.) ; (2) un dispositif de capture de position (Flock Of Bird, Ascension Inc.) ; (3, 4) un pédalier et un volant (ECCI, Trackstar 6000 GTS) ; (5) un siège de voiture ; et un moteur de réalité virtuelle (6). (B) Scène virtuelle typique montrant (1) Lignes pointillées (2) Obstacle (3) Voiture Meneuse (4) Participant.

À l'aide de questionnaires relatifs aux cybers malaises (Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993), nous vérifions l'influence de la présence – plus subjective – des participants. La présence est définie comme « le sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où notre corps se trouve » (Bouvier, 2009). D'après l'auteur, le sentiment de présence est une expérience subjective, consciente, qui dépend de

facteurs internes et externes à l'utilisateur. Cet effet découle de l'ensemble des caractéristiques objectives de la réalité virtuelle (i.e., immersion) énoncées précédemment.

II.2 Configuration environnementale et propriétés d'intérêt

II.2.1 La situation de dépassement automobile

Dans l'ensemble des quatre expériences, la présence d'éléments virtuels de l'environnement – i.e., véhicule *leader* (à doubler), véhicule obstacle, véhicule sujet, ligne de départ et ligne d'arrivée – et leurs dimensions physiques sont identiques. À l'inverse, leurs agencements dans l'espace – i.e., position et vitesse – évoluent en fonction des conditions expérimentales. La scène virtuelle (Figure 20, Panneau B) est composée d'une route à double sens de circulation d'une largeur de 3.5 m, d'un véhicule *leader* mesurant 4.415 m de long et 1.740 m de large et d'un véhicule obstacle immobilisé sur la voie de gauche. Les dimensions du véhicule obstacle sont égales à celle du véhicule *leader*. Le dimensionnement de la route à double sens et des lignes pointillées ou continues s'appuie sur la réglementation française en cours.

Le tableau (Tableau 2) ci-dessous indique les positions initiales des différents éléments virtuels de l'environnement dans l'ensemble des expériences. Chaque expérimentation propose pour chaque essai une phase d'approche. Elle permet aux conducteurs d'atteindre les vitesses requises au lancement de l'essai (Expérimentation 1). À ce stade, aucune voiture virtuelle n'est visible dans la scène visuelle.

Une fois le franchissement de la ligne de départ réalisé à la vitesse minimum satisfaisante (i.e., vitesse minimal pour réussir le dépassement en toute sécurité), une voiture à doubler roulant à vitesse constante (i.e., véhicule *leader*) et une voiture à éviter, immobile, (i.e., véhicule obstacle) apparaissent dans l'environnement routier virtuel, respectivement dans la voie de circulation du véhicule sujet et dans la voie opposée (Tableau 2).

Les conducteurs disposent alors d'une dizaine de secondes, avant d'atteindre la ligne d'arrivée, pour percevoir la faisabilité du dépassement et prendre la décision de l'initier tout en évitant les véhicules virtuels (*leader* et obstacle). Dans l'ensemble des expériences, un dépassement automobile est considéré réussi si le conducteur parvient à dépasser le véhicule

leader, à éviter le véhicule obstacle, et à franchir la ligne d'arrivée sans encombre. Une fois l'essai terminé, un nouvel essai démarre à la suite jusqu'à ce que le bloc expérimental soit terminé.

Tableau 2 : Configuration initiale des éléments virtuels de l'environnement pour chaque expérience.

	CAMPAGNES EXPÉRIMENTALES		
POSITION INITIALE DES ÉLÉMENTS VIRTUELS (EN M)	Expérimentation 1	Expérimentation 2	Expérimentation 3
Véhicule sujet	0	0	0
Véhicule leader	100 + Phase d'approche	70.1 + 45	70.1 + 45
Véhicule obstacle	246.7 + Phase d'approche	224.5 + 45	224.5 +45
Phase d'approche	Variable suivant le délai d'atteinte de la vitesse minimum satisfaisante	0 – 45	0 - 45
Ligne de départ	0 + Phase d'approche	45	45
Ligne d'arrivée	250 + Phase d'approche	250 + 45	250 + 45

II.2.2 Les propriétés d'intérêt du conducteur

Dans ce travail de recherche, nous manipulons deux propriétés de l'agent, i.e., les capacités d'action propre au conducteur. La première capacité d'action est relative à la vitesse maximale des véhicules conduits par les participants. Elle est notée V_{max}. Il s'agit dans un premier temps, en manipulant la vitesse maximale des conducteurs, de valider l'hypothèse selon laquelle ces derniers perçoivent intrinsèquement les possibilités d'action du véhicule conduit définies par le ratio entre les propriétés du système agent-environnement et les propriétés de l'agent (i.e., les capacités d'action) dimensionnées à partir d'unité de vitesse. Les vitesses maximales attribuées aux conducteurs sont choisies en fonction de la réglementation française en vigueur relative aux limitations de vitesse.

La seconde capacité d'action correspond à l'accélération maximale des véhicules conduits par les participants. Elle est notée A_{max}. Il s'agit cette fois-ci de vérifier si les conducteurs perçoivent intrinsèquement les possibilités d'action du véhicule conduit définies

par le ratio entre les propriétés du système agent-environnement et les propriétés de l'agent (i.e., les capacités d'action) dimensionnées à partir d'unité d'accélération. Les accélérations maximales imposées aux véhicules conduits sont définies à partir de dynamiques d'accélération issues de véhicules réels modélisées par le logiciel *CarTest2000*[13].

Les quatre expérimentations vont nous permettre de répondre à ces différentes interrogations :

- *MSV* et *MSA* sont-elles des propriétés d'intérêt pour les conducteurs ?
- Les conducteurs privilégient-ils une propriété du système agent-environnement pour prendre la décision d'initier et de réguler leur dépassement automobile?
- Les conducteurs sont-ils capables d'exploiter des limites d'action distinctes durant leur dépassement ?
- Les traits de personnalité des conducteurs ont-ils une influence sur la perception et l'exploitation des *affordances* de dépassement ?

II.3 Acquisition et analyse des données expérimentales

II.3.1 Acquisition des données expérimentales

Dans les trois expérimentations, nous avons enregistré les données comportementales des participants évoluant dans un environnement virtuel à l'aide d'un logiciel propre au laboratoire : *Imagine Create & Experiment* (*ICE*)[14]. La fréquence d'acquisition des données comportementales est de 75 Hz.

Les données comportementales enregistrées comprennent toutes les actions motrices des conducteurs vers les opérateurs du simulateur de conduite durant la réalisation d'un essai : frein, accélérateur, volant, rétroviseur et boîte de vitesse – cf. expérimentation 3. Ces actions motrices sont à l'origine des comportements observés: dépassement, poursuite, renoncement ainsi que des collisions associées susceptibles de se produire dans l'environnement virtuel.

[13] Glenn, Patrick. (2013) CarTest 2000, Automobile Acceleration Simulation Software, CarTest Software, http://www.cartestsoftware.com

[14] Logiciel de création d'objets 2D et 3D développé par Cédric Goulon (ingénieur CNRS) au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement depuis 2001.

L'environnement virtuel est programmé à partir d'un script issu du logiciel *ICE* permettant de créer des objets virtuels 3D. Les variables à enregistrer sont également notifiées dans ce même script avec une fréquence d'acquisition à fixer. À la fin de chaque essai, le logiciel procède à l'enregistrement des données expérimentales. Les fichiers d'enregistrement ainsi obtenus sont des fichiers texte, au format «.txt », regroupant l'ensemble des variables à sauvegarder déclarées dans le script *ICE*.

II.3.2 Analyse des données expérimentales

Après l'enregistrement, les variables sont analysées à l'aide du logiciel d'analyse et de programmation de données *MATLAB*[15].

Nous modélisons chacune des données individuelles de dépassement à l'aide d'une fonction sigmoïde (Bootsma, Bakker, van Snippenberg, & Tdlohreg, 1992, p. 6), en utilisant la *Toolbox*™ Statistiques de *MATLAB*, telle que :

$$y = \frac{100}{1 + \mathrm{e}^{-k(c-x)}}$$

où *k* est un paramètre relatif à la pente de la courbe quantifiant la soudaineté de la transition d'un mode d'action vers un autre (i.e., différence juste perceptible ou seuil différentiel). Le paramètre *c* correspond, quant à lui, à la valeur critique pour laquelle 50% des situations de dépassements était jugé possible (i.e., point d'égalisation subjective ou seuil absolu). Il quantifie de ce fait le lieu de transition d'un mode d'action à un autre. Les paramètres *k* et *c* sont donc respectivement des indicateurs de l'exactitude et de la précision de la sélection d'un mode d'action.

Enfin, le paramètre *x* représente la condition expérimentale dépendant des difficultés de dépassement exprimées dans une échelle de mesure extrinsèque (i.e., valeurs de *MSV* en m/s et/ou de *MSA* en m/s²) ou intrinsèque (i.e., valeurs de *MSV*/*Vmax* et *MSA*/*Amax* en %). Le chiffre 100 indique la fréquence maximale (en %) d'apparition d'un mode d'action (e.g., doubler dans chaque essai).

[15] Logiciel développé par la société *The MathWorks*. La version *R2011a* est utilisée lors de ce travail de recherche

Dans ce document, l'analyse de variance des comportements de dépassement est effectuée sur les moyennes du coefficient *c* (i.e., le point d'égalisation subjective) de chacun des conducteurs. Par ailleurs, dans l'expérimentation 2, une régression linéaire multiple à deux propriétés prédictives (MSV/V_{max} et MSA/A_{max}) est réalisée sur la moyenne des fréquences de dépassement. L'équation de la droite est du type :

$$y = a + b_1X_1 + b_2X_2$$

La fréquence des dépassements automobile est la variable dépendante – à prédire – (i.e., *y*) ; le coefficient *a* est l'ordonnée à l'origine ; b_1 est le coefficient de régression de la première variable indépendante – prédictive – (X_1 : MSV/V_{max}) et b_2 est le coefficient de régression de la seconde variable indépendante – prédictive – (X_2 : MSA/A_{max}). La significativité des résultats indique une relation linéaire multiple entre les comportements de dépassement (i.e., *y*) et les propriétés prédictives (MSV/V_{max} et MSA/A_{max}). Il conviendra alors de quantifier leurs influences respectives sur les comportements de dépassement à l'aide des coefficients de régression standardisés (b_1* et b_2*). Pour l'ensemble des analyses statistiques, le traitement est réalisé à l'aide du logiciel *STATISTICA* (version 10). Le seuil *p* de significativité est fixé à 0.05.

III. Chapitres Expérimentaux

III.1 Prise de décision et *affordance MSV/Vmax*

III.1.1 Résumé de l'expérimentation 1

Introduction

De nombreuses actions quotidiennes requièrent de l'individu une prise en compte de ses capacités physiques (e.g., attraper une balle avant qu'elle ne franchisse une ligne de but) pour agir avec réussite dans son environnement. Dans un contexte automobile, lorsqu'un conducteur décide d'initier un dépassement, le fait-il en considérant les limites de son véhicule ? De récentes études (Gordon & Mast, 1970; Gray & Regan, 2005) révèlent que 14% à 68% des accidents survenus lors d'un dépassement le sont au moment de son initiation, phase durant laquelle le conducteur estime la faisabilité du dépassement. Dans le cadre de cette expérimentation, nous postulons que la manœuvre de dépassement implique la perception d'*affordances*, i.e., des possibilités d'action, définies par des propriétés du système agent-environnement mises en relation avec des propriétés de l'agent. De nombreuses études ont mis en évidence la capacité des individus à percevoir des *affordances*, mais aucune étude jusqu'à présent ne s'était intéressée au dépassement automobile. Dans la continuité des travaux de Fajen concernant les tâches de freinage (e.g., Fajen, 2005a ; Fajen & Devaney, 2006) et en utilisant la formalisation mathématique de l'*affordance* établie par Warren (1984), l'expérimentation 1 questionne l'hypothèse selon laquelle un conducteur automobile désireux de doubler agirait en percevant les possibilités d'action de son véhicule. Cela suppose la perception d'une *affordance* du dépassement automobile définie par le ratio entre les propriétés relationnelles du système agent-environnement et une propriété de l'agent, i.e., les capacités d'action du conducteur. Ces deux propriétés correspondraient respectivement à la Vitesse Minimale Satisfaisante pour réussir un dépassement (*MSV*) et à la Vitesse maximale du véhicule conduit par les participants (*Vmax*). L'*affordance* de dépassement devrait ainsi renseigner les conducteurs sur la faisabilité du dépassement automobile. En d'autres termes, nous souhaitons déterminer si les conducteurs prennent la décision d'initier un dépassement en percevant une vitesse minimale satisfaisante (*MSV*) en référence à la vitesse maximale du véhicule conduit (*Vmax*).

Méthode

Afin de tester l'hypothèse selon laquelle les conducteurs percevraient une *affordance* de dépassement dimensionnée à l'action, à partir de propriétés cinématiques, nous avons constitué deux groupes, de huit conducteurs chacun. Le premier groupe possède une vitesse maximale faible (*Vmax* = 25 m/s) et le second groupe dispose, quant à lui, d'une vitesse maximale élevée (*Vmax* = 35 m/s). Dans chaque condition expérimentale proposée aux conducteurs, la difficulté du dépassement dépendait des quatorze valeurs de *MSV* calculées à partir des vitesses maximales des participants. Par ailleurs, dans chaque essai, les conducteurs possédaient une vitesse initiale égale à la *MSV* initiale (hormis pour les essais où la *MSV* initiale était supérieure à la *Vmax*). Dès lors, pour chaque condition de *MSV*, les participants du groupe avec une vitesse maximale élevée (*Vmax* = 35 m/s) devraient dépasser davantage que les participants du groupe avec une vitesse maximale faible (*Vmax* = 25 m/s).

Résultats

Des *t-test* pour groupes indépendants sont effectués sur les *PES* (i.e., Point d'Égalisation Subjective) des fréquences de dépassement individuelles, exprimées dans une échelle de mesure extrinsèque (i.e., en fonction de la *MSV*). Les courbes psychométriques confirment une plus grande propension au dépassement pour les groupes de conducteurs avec une vitesse maximale élevée. En d'autres termes, les *PES* du groupe de conducteurs avec une vitesse maximale faible sont inférieurs aux *PES* du groupe de conducteurs avec une vitesse maximale élevée. Chaque groupe de conducteurs possède ainsi des fréquences de dépassement différentes pour une même condition *MSV*.

Toutefois, des *t-test* pour groupes indépendants sont réalisés sur les *PES* des fréquences de dépassement individuelles, exprimées dans une échelle de mesure intrinsèque (i.e., en fonction de la *MSV/Vmax*). Les résultats ne permettent pas de conclure à l'existence de différences significatives entre les groupes de conducteurs. Par ailleurs, les fréquences de dépassement deviennent nulles pour les deux groupes de conducteurs lorsque la *MSV* excède la vitesse maximale de leur véhicule.

Discussion

Conformément à la théorie des *affordances* (J. J. Gibson, 1986) et à l'*affordance-based control* (Fajen, 2007a), l'ensemble des résultats obtenus met en évidence la capacité des conducteurs automobiles, durant leur dépassement automobile, à considérer les limites d'action de leur véhicule (i.e., *Vmax*). En d'autres termes, les conducteurs prennent la décision de dépasser en fonction des valeurs de l'*affordance* de dépassement *MSV/Vmax*. En ce sens, lorsque le ratio *MSV/Vmax* est inférieur à 100%, les conducteurs choisissent de dépasser. Dans le cas inverse, ils choisissent de sélectionner un autre mode d'action (i.e., poursuivre le véhicule leader ou renoncer au dépassement en cours de réalisation) jusqu'au franchissement de la ligne d'arrivée. Lors de cette étude, nous avons ainsi pu formaliser une nouvelle *affordance* et démontrer sa pertinence dans le cadre du dépassement automobile. Le cadre conceptuel des *affordances* nous a donc permis de rendre compte des processus de prise de décision des conducteurs.

Enfin, parallèlement au comportement de dépassement, nous avons pu observer des comportements de renoncement. Cette manœuvre se caractérisait dans un premier temps par l'initiation d'un dépassement puis, au cours du changement de voie, le conducteur estimait qu'il ne disposait pas de suffisamment de temps pour réussir à doubler le véhicule leader. Il décidait alors de fortement décélérer pour se rabattre derrière le véhicule leader, et ce, avant d'entrer en collision avec le véhicule obstacle. Cette capacité du conducteur à percevoir le moment opportun pour initier une manœuvre de renoncement implique de connaître très précisément les capacités de décélération de son véhicule. Dans le cadre de futures recherches, il serait ainsi intéressant de considérer la compétition entre deux *affordances* – dépassement et renoncement – afin de mieux comprendre les stratégies perceptivo-motrices en jeu lors du dépassement automobile (Marti, Morice, & Montagne, 2015) .

III.1.2 Manuscrit de l'expérimentation 1

An affordance-based approach to visually guided overtaking

Antoine H.P. MORICE[1], Gabriel J. DIAZ[3], Brett R. FAJEN[2], Numa BASILIO[1], and Gilles MONTAGNE[1]

[1]Aix-Marseille Université, CNRS, ISM UMR CNRS 7287, 13288, Marseille cedex 09, France

[2]Department of Cognitive Science, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy NY, USA

[3] Center for Imaging Sciences, Rochester Institute of Technology, New York, USA

Abstract

When an automobile driver overtakes a lead vehicle while avoiding oncoming traffic, does he or she do so with reference to the limits of his or her car? We investigated overtaking from the perspective of the theory of affordances. We define the *overtake-ability* affordance as a ratio of the Minimum Satisfying Velocity required for safe overtaking (*MSV*) to the Maximal Velocity of the driver's car (V_{max}). Two groups of subjects performed overtaking maneuvers, if deemed possible, by driving either a slow (V_{max} = 25 m/s) or a fast (V_{max} = 32.5 m/s) virtual car in overtaking situations constrained by fourteen values of *MSV*. For any given *MSV* condition, participants in the fast car group were more likely to attempt an overtaking maneuver. However, when *MSV* was expressed in intrinsic units as a ratio of V_{max} for both groups, the frequency of overtaking was not significantly different across groups. Furthermore, overtaking frequency dropped to near 0% for both groups when *MSV* exceeded V_{max}. In accordance with the affordance-based framework (Fajen, 2007a), our results suggest that participants select their overtaking maneuvers by perceiving an *overtake-ability* affordance.

Keywords: affordance-based control; visually guided action; driving; overtaking; virtual reality

An affordance-based approach to visually guided overtaking

Introduction

As people navigate through the world, they make many decisions (some with life-or-death consequences) that require them to be accurately attuned to their physical capabilities. Even a maneuver as common as attempting to overtake a car could prove to be fatal if the driver misjudges his or her ability to pass the lead car before reaching oncoming traffic. In 2011, the French Inter-ministry National Observatory for Road Safety reported that 12.71% of fatal automobile injuries in France occurred when drivers attempted to overtake a lead car by driving in the opposite lane (Footnote 1), highlighting the difficulty of this task and the consequences of failure.

We identify five phases of a basic overtaking maneuver, which we describe below using terminology that would apply in countries with right-side traffic. The process begins with the Start phase, during which the driver performs actions intended to help decide whether it is both legal and safe to initiate an overtaking maneuver, such as executing small lateral excursions in the opposite lane to improve viewing of the oncoming traffic. If the driver judges that conditions are safe enough to initiate an overtaking maneuver, he or she may then initiate a full lateral excursion into the opposite lane (Left phase) while accelerating if necessary to pass the lead car (Pass phase). Once the driver has visually verified that the lead car is now behind, he or she must return to the driving lane (Right phase) and end the overtaking maneuver (End phase).

Research in real-world (Clarke, Ward, & Jones, 1998; Wilson & Best, 1982) and laboratory (Gordon & Mast, 1970; Gray & Regan, 2005) conditions suggest that 14% to 68% of overtaking accidents are due to errors that occur during the Start phase when drivers judge whether to perform an overtaking maneuver. One of the aims of this study is to better understand the process underlying both the selection of an overtaking maneuver and its regulation. In an effort to clarify the causes of overtaking accidents, we consider the possibility that errors in deciding whether to initiate an overtaking maneuver can be attributed to difficulty in scaling the requirements for overtaking to the capabilities of the driven car.

The notion that drivers must decide if their own car's capabilities are sufficient given the requirements to overtake was proposed by Gray and Regan (2005). They reproduced

overtaking situations in a fixed-base driving simulator and hypothesized that drivers should perceive the Time Required for Overtake (*TRO*, computed from the lead car speed and position, participant's driving speed and driver's car dynamics model) and compare it with the Time To Collision of the oncoming car (*TTC*) to judge if overtaking is safe. If $TTC - TRO > 0$, then overtaking is safe; otherwise overtaking is unsafe and any attempt to overtake will result in collision with the lead or oncoming car. They found that drivers mainly decided to overtake when $TTC - TRO > 0$ but also that drivers continued to overtake when $TTC - TRO < 0$ on up to 16% of trials. Those errors were interpreted as either errors in drivers' perception of their action boundaries when estimating *TRO* or as difficulty in the initiation of the overtaking maneuver at a constant critical distance or time from the lead car.

$TTC - TRO$ specifies whether overtaking is possible as well as the margin for error in the temporal domain. However, it is not informative about the range of velocities that would bring about a successful overtaking maneuver. In other words, if drivers relied on $TTC - TRO$, they would not be able to perceive when overtaking is possible by traveling at some speed below their maximum speed (e.g., 75% of maximum speed) or the minimum percentage of their car's maximum speed that is required to successfully overtake. This is arguably more important than $TTC - TRO$ because drivers may need to compensate for unexpected events, such as a sudden head wind or an increase in speed of the lead or oncoming car. If drivers could perceive the minimum percentage of their car's maximum speed that is required to overtake, they would know before initiating the overtaking maneuver whether they will have the ability to further increase their speed to compensate for unexpected events.

In this study, we approach the overtaking task as a problem that involves the perception of "action-scaled" affordances, which are possibilities for actions defined by dimensions of the environment taken with respect to the agent's action capabilities. The ability to perceive action-scaled affordances has received increasing attention since Gibson's (1979) formulation of the theory of affordances. Researchers have investigated the perception of the "*catchability*" of fly balls (Fajen, Diaz, & Cramer, 2011; Oudejans, Michaels, Bakker, & Dolné, 1996), "*avoid-ability*" of a collision by braking (Fajen & Devaney, 2006; Fajen, 2005a, 2005b, 2005c), and "*pass-ability*" of a shrinking gap between converging obstacles (Fajen & Matthis, 2011) by showing that relevant properties of environment are perceived in relation to the kinematic characteristics of the body or one's vehicle. From this perspective,

the selection of appropriate actions entails a scaling of properties of the environment (e.g., speed needed to catch a fly ball) by one's action capabilities (e.g., maximum running speed).

Just as the selection of actions that are appropriately gauged to one's capabilities relies on the perception of affordances, so does the continuous regulation of movement based on optical information (Fajen, 2005b, 2007a). By this account, actors adjust their current behavior so as to keep the state needed to successfully complete the action within the range of possible states that are defined by the actor's capabilities. In the case of running to catch a fly ball, such a strategy entails adjusting running speed so as to keep the speed needed to catch the ball within a "safe" region between zero and the fielder's maximum possible running speed. Satisfying this requirement ensures that the action remains possible within the actor's limits. If the state needed to perform the task exceeds the actor's capabilities, then the task is no longer possible and a new action mode must be selected.

Let us apply the same logic to the overtaking task. First, we identify the two key variables that determine when overtaking is (and is not) possible within the capabilities of the driver's car: (1) *minimum satisfying velocity* (*MSV*), which we define as the minimum velocity required to overtake the lead car without colliding with the oncoming traffic, and (2) maximum velocity (V_{max}), which is the maximum possible speed of the driver's vehicle. The ratio of these two variables determines whether overtaking is possible. Specifically, if $MSV/V_{max} \leq 1$, it is physically possible to overtake the lead car because the minimum velocity required to overtake (*MSV*) is less than or equal to the velocity that the driver is capable of moving (V_{max}). Conversely, if $MSV/V_{max} > 1$, overtaking is not possible even by traveling at the car's maximum velocity. In that case, the driver is obliged to follow the lead car on the right lane until the oncoming car passes. Thus, the point at which *MSV* is equal to $V_{\max}$ defines an action boundary that separates situations in which it is still within the driver's capabilities to overtake from situations in which it is no longer possible to overtake.

In the present study, two groups of experienced drivers were instructed to perform overtaking maneuvers, if deemed possible, in a driving simulator. The maximum velocity V_{max} of the subjects' virtual car was manipulated as a between-subjects variable. The Minimum Satisfying Velocity (*MSV*) at the beginning of each trial was manipulated as within-subjects variable such that overtaking was possible on some trials and impossible on others, depending on whether *MSV* was greater than or less than V_{max}. If decisions about whether to overtake are

based on the perception of overtake-ability, and if subjects are sensitive to the limits of their virtual car, then they should choose to overtake when *MSV* is less than V_{max} (by a sufficient margin to allow for some error in the perception of *MSV*), and choose to follow rather than overtake the lead vehicle when *MSV* is greater than V_{max}.

Methods

Participants

Sixteen experienced drivers (3 women), 26.2 ± 4.9 years of age, all of whom held a driving license for 7.1 ± 4.1 years, took part in the experiment. All had normal or corrected-to-normal vision. They were not informed about the purpose of the study. A local ethics committee approved the experimental protocol.

Apparatus

The fixed-base driving simulator used in this experiment is illustrated in Figure 21. Participants sat in a playseat (Mobsim) and used their right foot to manipulate two spring-loaded pedals (Trackstar 6000 GTS, Extreme Competition Controls Inc), and their hands to manipulate a steering wheel (Trackstar 6000 GTS, Extreme Competition Controls Inc.). The data from the pedals and steering wheel were sent to a PC via a USB port. These data were used by an OpenGL custom-made virtual reality application (Imagine Create & Experiment, a software package developed at the Institute of Movement Sciences, Marseille) to control the torque and the direction of the wheels of a virtual car. The virtual scene from the driver's viewpoint was rendered stereoscopically at a frame rate of 75 Hz in a head-mounted display (Hi-res 900 stereo, Cybermind Corp). An electromagnetic tracking system (6 DoF Flock of Birds, Ascension Technology Corp.) linked the driver's viewpoint in the virtual world with rotations of the head, while maintaining the position of observation at 0.975 m above the ground, in the center of the driver's virtual seat. Two lateral buttons, located on the left and right hand sides of the steering wheel and a central button could be pressed to momentarily display side and/or center rear view mirrors.



Figure 21: Overview of the set-up. Participants sat on a play seat integrated into an aluminum frame and wore a head mounted display. They controlled the velocity of the virtual car with accelerator and brake pedals and lateral excursions between lanes with the steering wheel. Participants' head pitch, yaw and roll orientations were measured with an electromagnetic tracker and coupled to the visual scene. Participants could also display rear mirrors by pressing buttons on the steering wheel.

Virtual environment

The virtual environment depicted in Figure 22 was constructed so that road marking, road dimensions, and car appearance conformed to the French regulations. The visual scene included the car's hood, rear-side mirrors (i.e., left, right and central mirrors, when fixated and activated), a randomly rotated background composed by a blue lighted sky with mountains, a cement-textured rectilinear two-way road (2500 m long × 2 lanes × 3.50 m lane width), two superimposed white continuous lines defining the road's left and right edges, a white discontinuous line separating the two single lanes, and three cars (i.e., lead, participant and obstacle cars) measuring 4.415 m long × 1.740 m wide × 1.475 m high. In addition, a hatched-textured starting line (5 m long) crossed the two lanes and marked the start of the 300 m long experimental driving zone, and a hatched-textured ending line marked its end.

The lead car drove in the right lane and the obstacle car was in the left lane and remained immobile. The decision to use an immobile obstacle car was motivated by our aim to determine if collisions during overtaking are due to a failure to properly perceive the overtaking requirement in relation to the speed capabilities of one's car. If the obstacle car was moving, then it would have been impossible to determine whether any difficulties with

the overtaking task were due to a failure to properly scale the *MSV* to the car's maximum speed capabilities or a misperception of the approach speed of the oncoming car. In other words, keeping the obstacle car stationary helped to isolate any possible effects of miscalibration to one's speed capabilities. Although the overtaking task is often performed with an approaching obstacle car, it is not uncommon to encounter stationary obstacles in the passing lane. Many single-lane roads have temporary passing lanes that open up to two-lane roads for a short stretch to allow for passing. Similarly, when the passing lane on a highway is closed due to road construction, construction crews will sometimes place a stationary vehicle at the beginning of the lane closure. Thus, it is not uncommon for drivers to encounter situations in which they must decide whether to overtake a lead vehicle in the left lane and return to the right lane before reaching a stationary obstacle. The obstacle car was fully visible at the beginning of each trial.

Because there was no speedometer, participants' perception of velocity was based on optical flow and on auditory feedback played through a set of loudspeakers, that increased the frequency of the engine sound with participant's car velocity. The volume of the engine sound was kept constant across the experiment. No auditory feedback was provided about the lead or obstacle car's engine noise. A visual gauge, which was used to ensure that participants matched initial task requirements (cf. see next subsection), was displayed in the upper-middle portion of the screen before each trial.

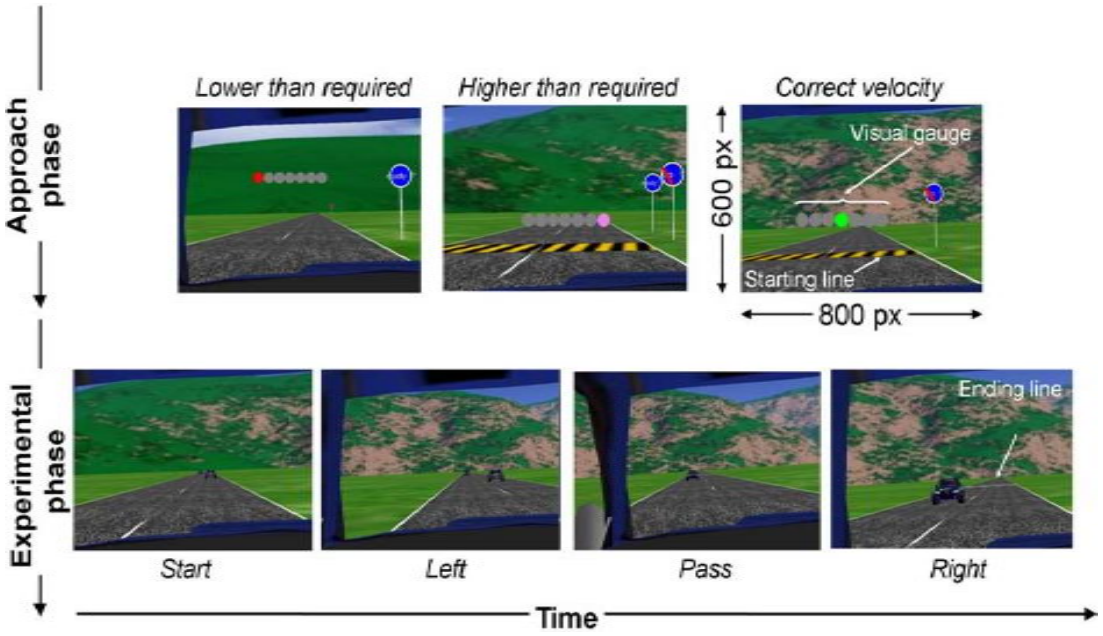


Figure 22: Screenshots of the virtual scenes during the approach (top) and the "start", "left', "pass" and "right" phases of an overtaking maneuver performed during the experimental session (bottom). During the approach phase, there was a visual gauge consisting of seven initially gray circles that changed color to indicate the participant's compliance with the trial's initial velocity requirements. Red circles on the left and blue circles on the right indicated that the participant's velocity was below or above the target velocity, respectively, and the green circle in the middle indicated that the participant was in compliance.

Dynamics of the participant's virtual car

Participants adjusted the velocity of their virtual cars by pushing and releasing the accelerator and brake pedals, which in turn, generated accelerative or decelerative torque that was applied to the wheels of the car's dynamical model. The torque generated by the accelerator ($torque_{acc}$) was determined by the following equation (1):

$$torque_{acc} = (V_C < V_{\max}) \cdot (K \cdot (pedal_{acc} \cdot V_{\max} - V_C)) \quad (1)$$

where V_C is the current car's velocity, $pedal_{acc}$ is the pedal's position ranging from 0 to 1, and K is a constant lag coefficient, which we set to 0.9 to apply realistic $torque_{acc}$. $V_C < V_{max}$ was equal to one when $V_C < V_{max}$ and zero when $V_C = V_{max}$, which ensured that no accelerative torque was applied when the car was traveling at its maximum speed.

The decelerative torque generated by the brake pedal was determined by (2):

$$torque_{decc} = (V_C > 0) \cdot (J \cdot (pedal_{dec} \cdot D_{\max})) \quad (2)$$

where $pedal_{dec}$ is the brake pedal's position ranging from 0 to 1, J was set to 3 to apply realistic $torque_{decc}$, and D_{max} is the maximum deceleration of the virtual car always set to -15 m/s². This allowed the slow and fast cars to stop from their V_{max} in about 2 and 2.33 s, respectively. $V_C > 0$ was equal to one when the car was moving and zero when it was stationary.

The accelerative and decelerative torques were fed into a physics engine (PhysX™, NVIDIA®), which determined the virtual car's velocity given the driver's commands together with resistance forces (e.g., air, rolling friction) and the car's properties (e.g., mass, damping, wheel radius). This allowed for more realistic behavior than would be possible if pedal positions were mapped directly to car velocity.

Participants controlled the initiation of lateral excursion between lanes by turning the steering wheel more than ± 30°. The first counterclockwise turn of the steering wheel beyond this threshold triggered a sigmoid-shaped lateral excursion from the right lane to the left lane. A subsequent clockwise turn moved the car from the left lane to the right lane. When initiating a lateral excursion on lane, the velocity of the car was kept constant during the curvilinear segments of the sigmoid trajectory. Participants were able to adjust car speed during the brief period of linear motion between the two curvilinear segments. However, the linear segment was very brief and any speed changes were negligible. The rate of change in heading during the lane change was pre-programmed and independent of the car's velocity. As such, the distance that the car traveled and the time spent during lane change varied from 36 to 48 m and from 1.1 to 1.5 s when the velocity of the car ranged from 5 to 25 m/s, respectively. When the car was not changing lanes, it was constrained to move within the lane.

Procedure

The experiment consisted of two sessions, which we refer to as the *familiarization session*, and *experimental session*. The familiarization session was designed to allow participants to familiarize themselves with the experimental task, controls, and setup, as well

as the key events that occurred during a trial. Each trial began with an approach phase in which participants attempted to match a target velocity using the visual gauge (Figure 22). The approach phase ended when participants passed the starting line at a target velocity (i.e., the MSV^{start} conditions ± 10%, see next subsection). When the participant's velocity matched with this requirement, the visual gauge disappeared, the lead and obstacle cars appeared and participant's behavior was unrestricted. Otherwise, the starting line moved 50 m further and the approach phase started again. After the end of the approach phase, participants practiced overtaking the lead vehicle if deemed possible. With this setup, the participant's velocity at the start of the trial was always equal to the MSV^{start} for that trial, except when the MSV^{start} exceeded V_{max}. In this case, the participant's velocity was equal to V_{max}. Participants were also encouraged to explore the capabilities of their car, including its maximum velocity and braking, during this phase. They were asked to monitor the behavior of the surrounding cars by using the side rear view mirrors (i.e., before starting an overtake maneuver and when cutting off the lead car trajectory). The familiarization session ended after one repetition of each of the 14 experimental conditions (see next subsection) presented in an ascending order. None of the participants reported having any difficulties controlling their car at the end of the familiarization session.

The experimental session started after the familiarization session and a short rest period. Experimental trials were identical to those experienced during the familiarization session. However, participants were reminded that during the experimental session, they should attempt to reach the finish line as soon as possible while absolutely avoiding collisions as in a real driving situation. The time spent by participants from the starting line to the ending line was provided as a feedback to participants. The experimental session lasted approximately one hour per participant. Short rests were given regularly according to participant's individual requests.

Independent variables

Our approach to the question of whether drivers are properly attuned to the limits of their car during overtaking was to investigate the influence of the car's maximum velocity on the perception of safe overtaking possibilities. As such, we manipulated the car's maximum

velocity (V_{max}) as a between-participants variable with two levels (25 and 32.5 m/s). Participants were thus divided into two groups of mixed genders. Half of participants were assigned to the *slow* virtual car condition with V_{max} = 25 m/s, and the other half to a *fast* virtual car condition with V_{max} = 32.5 m/s. We manipulated the Minimum Satisfying Velocity at the start of each trial (MSV^{start}) as a within-participants variable with 14 values ranging from 2.5 to 32.5 m/s in 2.5 m/s increments. *MSV* was calculated as the quotient of two values d_S and $t_{overtaking}$. d_S is the length of the trajectory that the participant's car *S* must follow to move from its current location to a location in the right lane with its front bumper aligned with the front bumper of the obstacle car *O*. The calculation of d_S included not only the distance that the participant's car traveled parallel to the road but also the lateral distance traveled during lane changing. $t_{overtaking}$ is the amount of time remaining until the lead car reaches the location where its front bumper is just behind the rear bumper of S at the end of overtaking (Figure 23).

This yielded 14 MSV^{start}/V_{max} ratios ranging from 10% to 140% for the slow car and from 7.69% to 107.7% for the fast car**.** The distance at which the lead and obstacle cars appeared at the start of the trial (as measured from the center of cars) remained constant over the experiment. The velocity of the lead car remained constant during a trial but was varied across conditions to be always equal to the half of the MSV^{start} value. The obstacle car remained immobile on the left lane of the road. Details of the construction of experimental conditions are reported in Table 1. Two trials during which a car overtook the participant's car in the left lane were added to randomly chosen MSV^{start} conditions for each participant. This discouraged them from systematically initiating an overtaking maneuver at the start of the trial without checking their rear view mirrors. The resulting 16 trials were presented in random order into blocks that were repeated five times, resulting in a total of 80 trials.

Dependent variables

Analyses focused on the frequency of collision, the selection of driving maneuver, and velocity regulation during the overtaking maneuver.

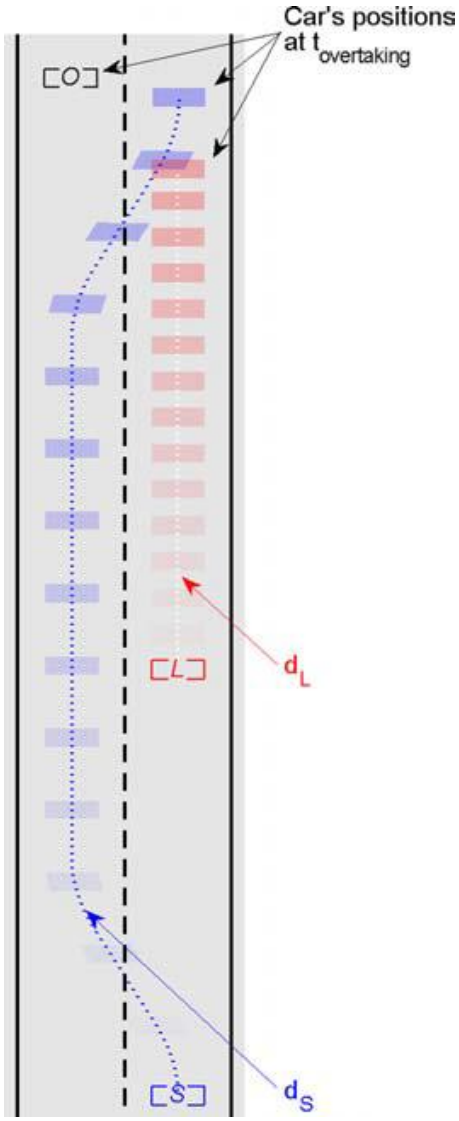


Figure 23: Numerical simulations of participant's (*S*) and lead (*L*) car's trajectories when travelling the distance d_S and d_L during the MSV^{start} condition equal to 32.5 m/s. Successive current positions of *S* and *L* cars are displayed every 40 ms while the obstacle car (*O*) remains immobile. $t_{overtaking}$ occurs when the front bumper of *S* is aligned with the front bumper of while the front bumper of *L* is just behind the rear bumper of *S*. Axes are not square for the sake of illustration

Collisions: We identified in each trial the occurrence of a collision between the participant's car and either of the two surrounding cars. We identified the maneuvers during which collision occurred (i.e., overtaking, following, or bailing-out) and the type of collisions (i.e., collision with the lead car or with the obstacle car). The frequency of collision was calculated for each participant and for each of the 14 MSV^{start} conditions. (A frequency of

100% indicates the occurrence of a collision on all five trials of a given MSV^{start} condition, and 0% in none of them).

Table 1: Initial positions and velocities of the participant's, lead, and obstacle cars used to compute the minimum satisfying velocities MSV^{Start} conditions, and corresponding values of the $MSV^{Start}/Vmax$ ratios obtained when manipulating *Vmax* as a between-participants variables. The 14 MSV^{Start} conditions were set by adjusting the lead car's velocity (V_L) while keeping constant the positions on the Y-axis of the lead (Y_L) and the obstacle (Y_0) cars relative to those of the participant's car.

All cars	MSV^{start}	2.50	5	7.50	10	12.50	15	17.50	20	22.50	25	27.50	30	32.50	35
	V_L	1.25	2.5	3.75	5	6.25	7.5	8.75	10	11.25	12.5	13.75	15	16.25	17.5
	Y_L	102.21	102.21	102.21	102.21	102.21	102.21	102.21	102.21	102.21	102.21	102.21	102.21	102.21	102.21
	Y_0	243.79	243.79	243.79	243.79	243.79	243.79	243.79	243.79	243.79	243.79	243.79	243.79	243.79	243.79
Slow (V_{max} = 25 m/s)	MSV^{start}/V_{max}	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Fast (V_{max} = 32.5 m/s)	MSV^{start}/V_{max}	7.69	15.39	23.08	30.77	38.46	46.15	53.85	61.54	69.23	76.92	84.62	92.31	100.00	107.69

Selection of action: We identified in each trial the maneuver selected by each participant: overtaking, bailing out, and following. The occurrence of an overtaking maneuver was defined as the succession of the five phases described in introduction in the participant's car's trajectory. The computation of overtaking frequency also included trials in which participants attempted an overtaking maneuver but collided with the obstacle car provided that the collision occurred after an initiation of a lateral excursion from the left to the right lanes. The occurrence of a bailout maneuver was defined by the following four consecutive phases: (a) a lateral excursion from the right to the left lane, (b) driving in the left lane without passing the lead car, (c) a lateral excursion from the left to the right lane, and (d) passing the obstacle car while driving in the right lane behind the lead car. The computation for bailing out frequency also included trials in which participants collided with the obstacle car or the lead car provided that the collision occurred after the initiation of a lateral excursion from the left to the right lanes. The occurrence of a following maneuver was defined by (a) the absence of any lateral excursion from the lane during the whole trial, and (b) passing the obstacle car while driving on the right lane after the lead car. The frequency of each maneuver was calculated for each participant and each of the 14 MSV^{start} conditions.

Regulation of action: Although our focus was on the decision to overtake or follow the lead vehicle, we also analyzed participants' behavior during the overtaking maneuver. For all trials during which participants attempted to perform an overtaking maneuver (including safe overtaking, safe bailing out, and maneuvers with collisions), we computed the ratio between the current velocity and the maximum velocity of the participant's car ($V_S/V_{\max}$), and the ratio between the current Minimum Satisfying Velocity and the maximum velocity of the participant's car (MSV/V_{max}). Measurements were taken at the beginning of each of the five phases of overtaking maneuvers. Values were then averaged across trials for each participant and each of the 14 MSV^{start} conditions.

Statistical analyses

The data from trials in which a car overtook the participant's car at the beginning of the trial were excluded from all analyses. A two-way, mixed-design ANOVA was performed on the

frequency of overtaking with the independent variables being V_{max} (slow, fast) and MSV^{start} (14 MSV^{start} from 2.5 to 35 m/s by 2.5 m/s increments). The frequency of overtaking data were then fitted (using a least square procedure) by individually adjusting α and β in the logistic function provided by the equation $p(x) = 1 \Big/ \left(1 + \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}\right)$ in which $p(x)$ corresponds to the probability of observing an overtaking maneuver, and x is either MSV^{start} or $MSV^{start} / V_{\max}$. The resulting logistic fits were then used to derive the Point of Subjective Equality (*PSE*, i.e., the critical value at which the overtaking frequency was equal to 50%) for each participant. t-tests for independent groups were then performed on individual *PSE* values expressed as a function of MSV^{start} to quantify between group differences in the selection of overtaking maneuvers. In addition, t-tests were performed on individual *PSE* values expressed as a function of $MSV^{start} / V_{\max}$ to test the prediction that behavior would be similar across groups when *MSV* was expressed as a ratio of V_{max}.

For all statistical analyses, the *p* value for statistical differences was set to .05. Partial effect sizes were computed (η^2_p) and post hoc comparisons were conducted using Newman-Keuls *a posteriori* tests.

Predictions

The present study was designed to test the hypothesis that drivers are capable of perceiving overtake-ability, which allows them to perceive the requirements for overtaking in relation to their car's speed capabilities. Two predictions about participants' behavior in the context of the present experiment can be derived from this hypothesis.

First, collisions should rarely occur when $MSV / V_{\max} > 1$ because participants should perceive that overtaking is not within their capabilities and choose to follow the lead car rather than overtake. Second, the frequency of overtaking should decrease as MSV^{start} increases from zero to V_{max} for participants in both groups. Because V_{max} differs across groups, participants in the

Fast group should be more likely to overtake the lead vehicle for any given value of MSV^{start} (except for values at the low and high ends of the range, where overtaking frequency should be close to 100% and 0% for both groups). However, when MSV^{start} is expressed as a percentage of V_{max}, the frequency of overtaking should be similar across groups.

Results

Collisions

The first set of analyses focused on the influence of MSV^{start} and V_{max} on the frequency of collisions. The black and gray histograms plotted on the lower and upper x-axis of the top panels of the Figure 24 show the mean percentage of collisions plotted as a function of MSV^{start} for the slow and fast cars, respectively. Collisions were infrequent, never exceeding 10% in any condition, indicating that participants drove safely on the large majority of trials. In addition, collisions occurred more often during overtaking and following maneuvers (1.35% and 1.79%; left and right panels, respectively) than during bail-out maneuvers (0.27%; middle panel).

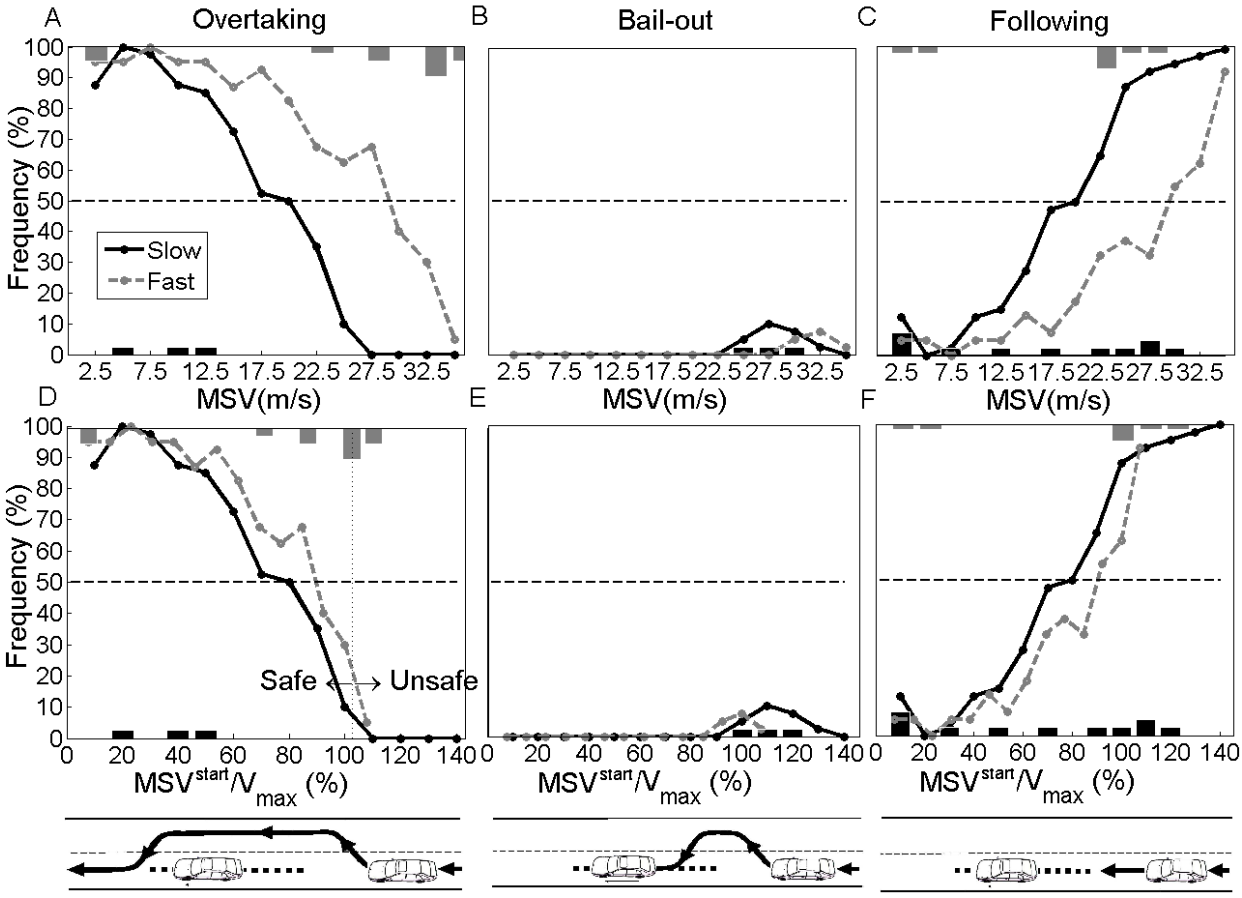


Figure 24: Average frequencies of Overtaking (A-B), Bailing out (C-D) and Following maneuvers (E-F) plotted as a function of MSV^{Start} (top) and as a function of $MSV^{Start}/Vmax$ (bottom) for the slow (plain black line) and fast cars (dotted gray line). The black histogram plotted on lower x-axis and the gray histogram plotted on the upper x-axis depict the average frequencies of collisions in each maneuver (i.e., overtaking, bailing out, following) as a function of the MSV^{Start} (top) and $MSV^{Start}/Vmax$ (bottom) for the slow and fast cars, respectively.

In order to determine whether collisions were most likely to occur when overtaking was not possible, we plotted histograms on the bottom panels of Figure 24 showing the same mean percentage of collisions as a function of the MSV^{start}/V_{max} ratio. Interestingly, collisions were most likely to occur when overtaking was possible (i.e., when $MSV^{start}/V_{max} \leq 1$), irrespective of both V_{max} (slow vs. fast) and whether the participant was overtaking, bailing out, or following. This is an interesting result because if collisions during overtaking are due to a failure to perceive the requirements for overtaking in relation to the car's speed capabilities, then one would expect most collisions to occur because drivers attempt to overtake when it is not within their capabilities to do so. The fact that collisions were most frequent when $MSV^{start}/V_{max} \leq 1$ suggests

that failures during overtaking are due to factors other than the misperception of an affordance. Finally, the analysis of collisions also showed that collisions occurred more frequently with the lead car than with the obstacle car (2.15 vs. 0.72 %). Collisions with the lead car occurred because participants occasionally waited too long to initiate a change to the left lane, which resulted in rear-ending the lead car, or initiated a change back to the right lane too soon, resulting in side-swiping the lead car. Such collisions could reflect some difficulty in coordinating the movement of one's car with another moving car due to the unconventional operation of the steering wheel in our experiment. However, it is important to keep in mind that collisions with both the lead car and the obstacle car were quite infrequent.

Selection of action

The next set of analyses focused on the influence of MSV^{start} and V_{max} on the frequency of overtaking. The black and gray curves in Figure 24A show the mean frequency of overtaking plotted as a function of MSV^{start} for the slow and fast cars, respectively. As expected, overtaking frequency decreased as MSV^{start} increased roughly according to a sigmoid function from 100% to 0% for each participant. In addition, although subjects in the slow car group were less likely to attempt an overtaking maneuver, the relation between overtaking frequency and MSV^{start} followed a similar shape for the two groups.

A two-way ($MSV^{start} \times V_{max}$) ANOVA with repeated measures on MSV^{start} performed on overtaking frequency revealed a main effect of MSV^{start} ($F[13, 182] = 37.25$, $p < .05$, $\eta^2_p = .73$). The ANOVA also revealed a main effect of V_{max} ($F[1, 14] = 13.73$, $p < .05$, $\eta^2_p = .49$), confirming that subjects in the slow car group attempted significantly fewer overtaking maneuvers than subjects in the fast car group (46.78 vs. 70.84 %). The overtaking frequency data from the two groups were thus fitted with a logistic function to compute the *PSE* values expressed as a function of MSV^{start} conditions. A t-test for independent groups performed on *PSE* values revealed that the *PSE* is significantly inferior for the slow car group ($M = 18.64$ m/s) compared to

the fast car group (M = 27.33 m/s; t = -3.38, df = 14, $p < .05$), confirming that subjects in the slow car and fast car groups exhibited different overtaking frequencies for the same MSV^{start} conditions.

The black and gray curves in Figure 24D depict mean frequency as a function of MSV^{start}/V_{max} for the slow and fast cars, respectively. Importantly, overtaking frequency dropped to 0% for both groups very close to the point at which MSV^{start}/V_{max} exceeded 1.0 (i.e., when the minimum velocity satisfying to successfully overtake the lead car was greater than the car's maximum velocity). This suggests that subjects in both groups were able to reliably perceive when overtaking was not within the capabilities of their car. The curves for the two groups in Figure 24D nearly overlap, suggesting that the likelihood of overtaking was similar across groups for most values of MSV^{start} expressed as a ratio of V_{max}. Again, the overtaking frequency data for each individual subject in both groups were fitted with a logistic function to compute the *PSE* values expressed as a function MSV^{start}/V_{max}. The t-test for independent groups performed on *PSE* values reveals that *PSE* is not significantly different between the slow car and fast car group (M = 79.32; t = -1.09, df = 14, p>0.05).

Table 2: Individual values of point of subjective equality (PSE) provided by the best logistic fits of individual mean frequency of overtaking expressed as a function of MSV^{Start} values and as a function of $MSV^{Start}/Vmax$ values for the slow and fast groups. The R^2, α and β values provided by each individual logistic fit are also provided.

					MSV^{start}	MSV^{start}/V_{max}
Group	Participants	α	β	R^2	PSE (m/s)	PSE (%)
slow	1	77.68	6.47	0.92	19.42	77.68
slow	3	49.50	4.09	0.90	12.34	49.37
slow	7	57.99	9.39	0.98	14.62	58.49
slow	10	82.00	10.75	0.93	20.50	82.00
slow	12	100.33	123.10	0.93	25.08	100.33
slow	14	82.04	55.06	0.99	20.53	82.11
slow	16	64.90	4.19	0.95	16.23	64.90
slow	18	81.53	5.23	0.83	20.38	81.53
Mean± Std		74.50±16.17	27.28±42.32	0.93±0.05	18.64±4.03	74.55±16.13
fast	2	71.97	7.09	0.91	23.39	71.97
fast	4	86.26	71.67	0.97	28.04	86.26
fast	6	101.15	19.17	0.89	32.87	101.15
fast	8	57.92	6.79	0.95	18.83	57.92
fast	9	97.04	8.50	0.86	31.32	96.37
fast	11	58.78	2.74	0.88	19.10	58.78
fast	13	99.10	153.89	0.97	32.21	99.10
fast	15	99.74	4.88	0.50	32.89	101.21
Mean± Std		83.99±18.54	34.34±53.39	0.87±0.15	27.33±6.06	84.09±18.66

Although the PSE values were not significantly different, there does appear to be a trend toward a higher percentage of overtaking for subjects in the Fast condition. We can only speculate about why this trend exists. One possibility is that on trials in which there was uncertainty about whether to overtake or follow, subjects in the Fast group were more biased to overtake compared to subjects in the Slow group for the following reason. The overall percentage of trials in which overtaking was possible was greater for subjects in the Fast group. This is because the set of MSV^{start} values were the same for the two groups, but subjects in the Fast group could accelerate to a faster V_{max}. This may have induced a bias among subjects in the Fast

group to overtake rather than follow, which could account for the small differences between the two groups in Figure 24D and Figure 24F.

Taken together, the analysis of overtaking frequency is consistent with the hypothesis that the decision about whether to overtake was based on the perception of the overtaking affordance, defined by the ratio of *MSV* to V_{max}. When safe overtaking was not possible (i.e., when $MSV^{start}/V_{max} > 1$), drivers consistently chose to follow the lead vehicle rather than attempt an overtaking maneuver (see Figure 24C and Figure 24F). Close inspection of Figure 24C and Figure 24F reveals that whereas overtaking frequencies were equal to zero when the MSV^{start}/V_{max} ratio exceeded 100%, following frequencies did not reach 100% at the same point. This was due to four participants of the Fast group and three participants of the Slow group who occasionally executed bail-out maneuvers when the MSV^{start}/V_{max} ratio was close to 100% (see Figure 24B and Figure 24E).

Regulation of action

Having established the role of MSV^{start}/V_{max} in the selection of driving maneuvers, we now consider the regulation of velocity during overtaking. The small vignettes of the lower panel of the Figure 25 depict the unfolding of the current *MSV* and velocity of the participant (V_s) over time for a representative participant over the five repetitions of each of the MSV^{start}/V_{max} conditions.

When MSV^{start}/V_{max} was low at the start of the trial (i.e., less than 40%; the first five vignettes in the lower panel of Figure 25; see also the A vignette on the upper panel of Figure 25 for a typical labeled trial), participants consistently increased the car's velocity throughout the trial up to V_{max}. The consistent increase in velocity from the beginning of the trial makes sense, as the low initial value of MSV^{start}/V_{max} specifies that overtaking is easily within the car's velocity capabilities.

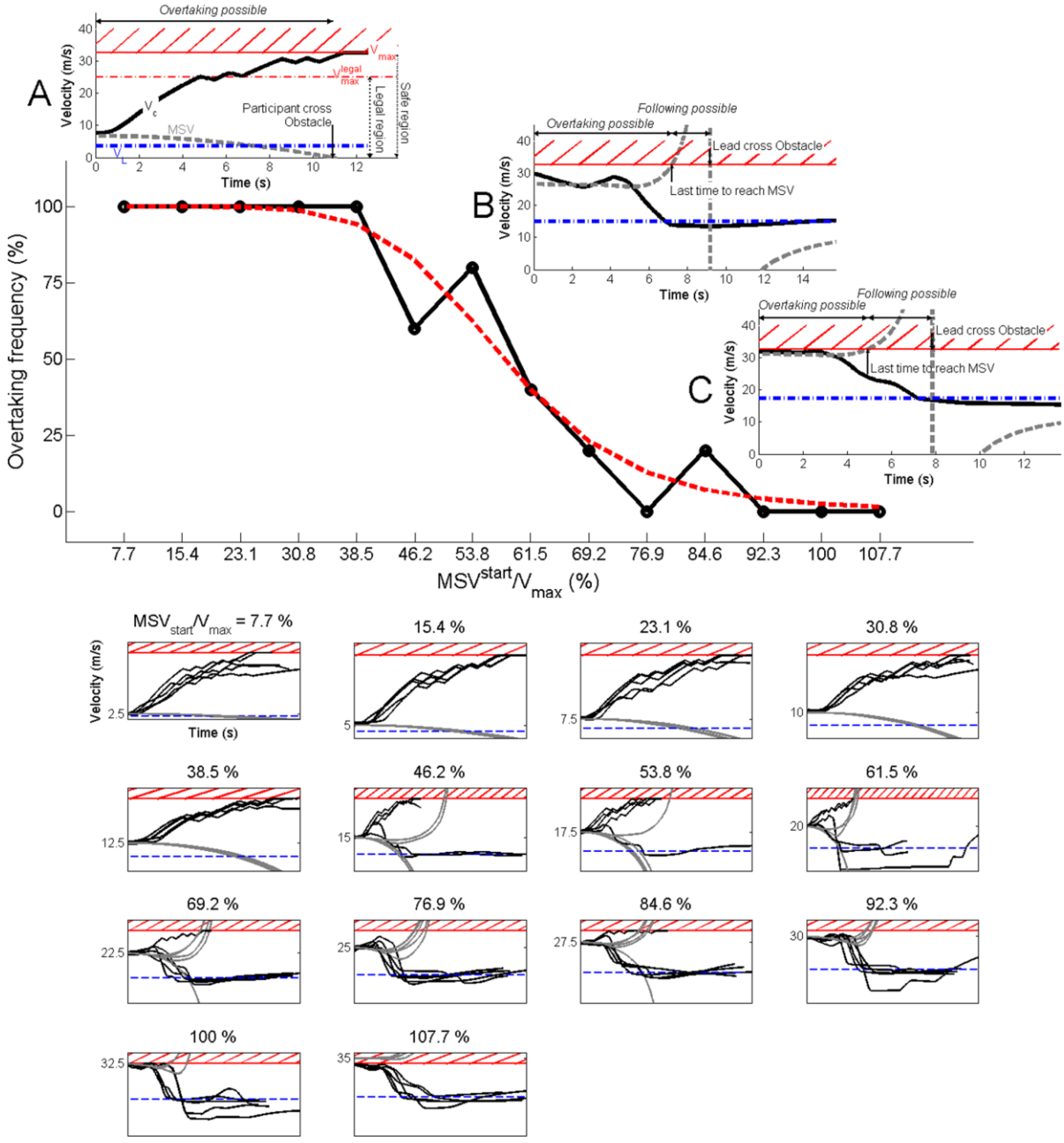


Figure 25: Typical individual set of overtaking frequencies monitored with participant ID number 8 over the five repetitions of each condition. On the upper panel, the sigmoid curve (dotted line) depicts the individual fit of overtaking frequencies by a logistic function, plotted as a function of the MSV^{Start}/V_{max} ratios with the point of subjective equality (*PSE*). The A-C large vignettes depict trial's samples of kinematics monitored during low, medium and high MSV^{Start}/V_{max} conditions (30, 75 and 90%) and giving rise to Overtaking, Bailing out and Following maneuvers, respectively. Vertical arrows indicate punctual temporal events (e.g., the time at which the participant or the lead car cross the level of the obstacle car). Horizontal arrows indicate the possible action modes (e.g., overtaking and following maneuvers). On the lower panel, the 14 small vignettes depict the current participant's velocity (V_S, solid black line), lead car's velocity (V_L,

dotted blue line), Minimum Satisfying Velocity for overtaking (*MSV*, dotted gray line), maximum velocity of the participant's car (V_{max}, hatched red area) monitored during the 5 repetitions of each MSV^{Start}/V_{max} ratio.

Participants' behavior was also quite consistent across trials when MSV^{start}/V_{max} was high at the start of the trial (i.e., greater than 75%; the last 5 vignettes in the lower panel of Figure 25; see also the C vignette on the upper panel of Figure 25). In these conditions, the *MSV* at the beginning of the trial ranged from slightly less than V_{max} to slightly greater than V_{max} (horizontal red line), which means that the margin for safe overtaking was very small or non-existent. Given the instructions to avoid collisions as one would do in the real world, it is not surprising that participants consistently decelerated until their speed fell below that of the lead car and followed, rather than overtook, the lead car.

Behavior was somewhat less consistent for values of MSV^{start}/V_{max} in the middle of the range, as depicted in the vignettes corresponding to values of MSV^{start}/V_{max} between 40% and 75% in the lower panel of Figure 25. Participants accelerated to V_{max} on some trials and decelerated to match the speed of the lead car on other trials. Occasionally, participants started to accelerate and initiated an overtaking maneuver by switching to the left lane, but then decelerated to the speed of the lead car and returned to the right lane, to follow the lead car. The B vignette on the upper panel of Figure 25 shows an example of such a trial, which we classified as a bail out.

We also analyzed the mean ratio of the participant's car velocity (V_S) to V_{max} at the beginning of each of the five phases of the overtaking maneuver (see Figure 26). V_S/V_{max} is plotted as a function of MSV^{start}/V_{max} for both successful (safe) and unsuccessful (unsafe) trials. In accordance with the experimental protocol, $V_S/V_{\max}$ varied systematically with MSV^{start}/V_{max} at the beginning of each trial (Start phase). Over successive phases, V_S/V_{max} approached 100%, indicating that participants generally accelerated to V_{max} throughout the trial when they overtook the lead car. Interestingly, the participant's mean speed on unsafe trials (designated by the star symbols in Figure 26) was consistently greater than their mean speed on safe trials (designated by the circular symbols) at the beginning of the Left phase. This suggests that one of the causes of collisions was driving too fast during the Start phase, which elevated the risk of rear-ending the lead car before completing the lane change. Likewise, participants' mean speed on unsafe trials was consistently less than their mean speed on safe trials during the Pass, Right, and Stop phases.

Thus, another cause of collisions was driving too slow after switching into the left lane, which may have occurred when participants attempted to bail out too late. These analyses provide some insight into the causes of collisions. However, it is important to keep in mind that collisions were very infrequent, and almost never resulted from attempting to overtake the lead vehicle when overtaking was not possible.

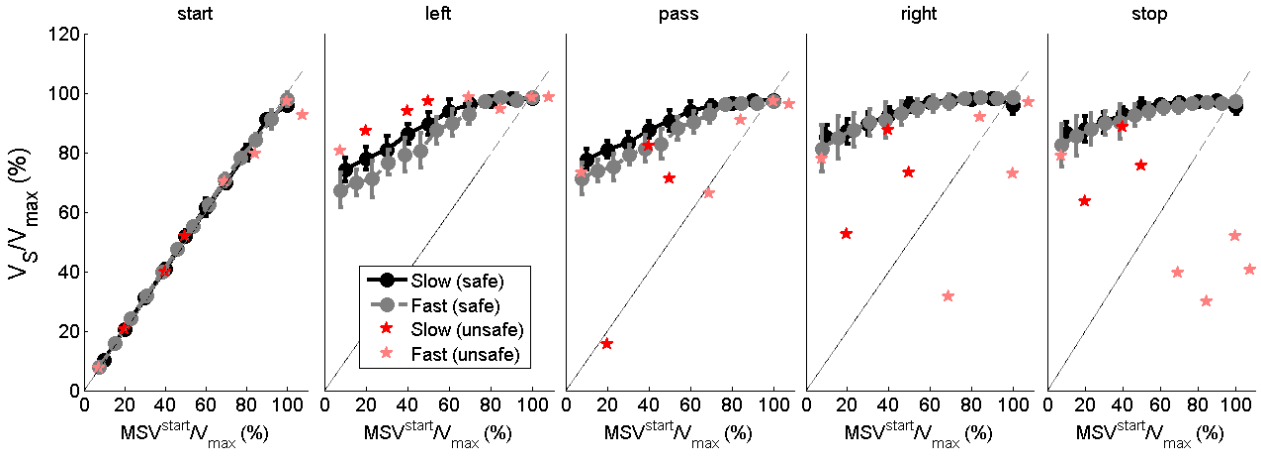


Figure 26: Average ratio between the participant's velocity over the participant's maximum velocity ($V_S/Vmax$) plotted as a function of the $MSV^{Start}/Vmax$ conditions during the five successive phases of the overtaking maneuver. Values are computed during safe (● symbols) and unsafe overtaking maneuvers (★symbols) with dark and light colors for the slow and fast cars, respectively. Vertical bars depict the standard deviation of individual mean.

Discussion

The objective of this study was to investigate the perceptual-motor processes underlying visually guided overtaking maneuvers. We hypothesized that drivers deciding whether or not to initiate an overtake of a lead car would rely on an *overtake-ability* affordance, which we defined as the ratio of the velocity needed to overtake the lead car while avoiding a collision with the obstacle car (i.e., the minimum satisfying velocity, or *MSV*) to the maximum velocity of the driver's car (V_{max}). In a virtual environment, two groups of experienced drivers drove either a slow or a fast virtual car and performed overtaking maneuvers, if deemed possible, as safely as in real-world situations. By varying V_{max} as a between-participants factor and MSV^{start} as a within-

participants factor, we manipulated *overtake-ability* in 14 conditions ranging from easily overtake-able when $MSV^{start} / V_{max} < 100\%$ to not overtake-able when $MSV^{start} / V_{max} > 100\%$.

Analyses of collisions

We hypothesized that if overtaking decisions are based on the perception of overtake-ability, then drivers should be able to reliably distinguish between situations in which overtaking is within their car's capabilities and situations in which overtaking is not within their car's capabilities. As such, collisions should be infrequent when the velocity needed to overtake is greater than the car's maximum velocity (i.e., $MSV^{start}/V_{max} > 1$) because drivers should perceive that overtaking is not possible and should choose to follow the lead vehicle rather than overtake. The findings were consistent with this prediction. Collisions were infrequent and when they did occur, they were no more likely to occur on trials in which overtaking was not possible compared to trials in which overtaking was possible.

The frequency of collisions in our study (overall, 2.95% trials) was well below the frequency of collisions (approximately 15% of trials) reported in other laboratory studies (Gordon & Mast, 1970; Gray & Regan, 2005). This discrepancy could be due to the fact that the obstacle car was stationary in the present experiment and approaching in the other studies. This leads to a possible alternative explanation for collisions during overtaking. Rather than collisions resulting from a failure to be properly attuned to the capabilities of one's car, collisions may occur because drivers misperceive the approach speed or time-to-contact of the other car (Björkman, 1963; Silver & Farber, 1967). This seems like a plausible hypothesis given how far away the other car typically is when the driver has to make the decision about whether or not to overtake.

Driver's sensitivity to the MSV^{start}/V_{max} ratio for selecting overtaking action

We also investigated the relationship between the selection of a driving maneuver (i.e., overtaking, following, or bailout) and the possibility to perform an overtaking maneuver (i.e., *overtake-ability*). These analyses revealed that the frequency of overtaking dropped from

100% to 0% and the frequency of following rose from 0% to 100% as MSV^{start} approached V_{max}. Bailouts were infrequent. Furthermore, although subjects in the fast car group were more likely to overtake than subjects in the slow car group, their behavior was similar when overtaking and following frequencies were plotted as a function of the MSV^{start}/V_{max} ratio. These analyses, when taken together with the finding that collisions were infrequent, provide further evidence that drivers are sensitive to the velocity capabilities of their cars and that they are able to scale overtaking requirements to their capabilities when choosing whether to overtake. The findings also support the hypothesis that the selection of overtaking actions is driven by the perception of affordances.

It is interesting to note that overtaking frequency is not strictly equal to 0% when MSV^{start}/V_{max} is equal to 100% as one might expect, but rather 10% and 29.9% for the slow and fast cars, respectively (see Figure 24D). This could reflect a minor difference between the *MSV* that we calculated for the purposes of our analyses and the *MSV* that subjects actually perceived. When we calculated *MSV* for our analyses, we assumed that the participant's car must completely return to the right lane before it reaches the obstacle car. However, because all three cars were slightly narrower than the lane, it is possible for the participant's car to pass by the obstacle car without a collision before completely returning to the right lane. Obviously, this would be an extremely risky maneuver. However, if participants perceived *MSV* in a way that allows for this riskier maneuver, they may have perceived that overtaking was possible even when MSV^{start}/V_{max} (computed in the non-risky way) was equal to 100%.

Additional issues

Lastly, we consider two theoretically significant issues that were not directly addressed by the present study but that could be considered in future studies of overtaking from an affordance-based perspective.

First, V_{max} is not the only property of the car that affects overtake-ability. The car's maximum turning rate also determines whether overtaking is possible because the faster the

driver can change lanes, the more time he or she has to overtake the lead vehicle before having to return to the right lane. Similarly, overtake-ability is also determined by the dimensions of the car (i.e., longer and wider cars require faster maximum satisfying velocities). We cannot draw any conclusions about drivers' attunement to the dimensions of their car on the basis of the present study. However, previous studies have demonstrated that humans are capable of perceiving affordances in other contexts when the dimensions of their body are altered by handheld objects and tools (Ishak, Adolph, & Lin, 2008; Wagman & Malek, 2007; Wagman & Taylor, 2005)

Second, although we focused on the perception of overtake-ability, overtaking may also involve the simultaneous perception of another affordance. Even after a driver initiates an overtaking maneuver by switching to the left lane and accelerating, it may still be possible to decelerate and return to the right lane behind the lead car. We referred to such maneuvers as bail-outs and observed them on a small percentage of trials, presumably when the participant initiated an overtaking maneuver and later realized that the margin for error was too small. However, in order to bail out, the driver must be able to decelerate rapidly enough to return to the left lane behind the lead car before arriving at the obstacle car. If the driver waits too long and the car's deceleration capabilities are too weak, then bailing out may not be possible. In other words, in addition to perceiving overtake-ability, the driver may also need to perceive whether bailing out is still within his or her capabilities. In this regard, a more complete account of drivers' behaviour during overtaking may be possible by considering overtaking in terms of a competition between two affordances (Marti, Morice & Montagne, 2015).

Conclusions

In conclusion, the findings of the present study show that drivers are sensitive to the limits of their car's velocity capabilities, and properly scale the overtaking requirements with reference to these limits when selecting and regulating overtaking, as suggested by the affordance-based framework. Collisions that occur during overtaking may be due to factors other than a failure to properly take the speed capabilities of one's car into account, such as a misperception of the approach speed or time-to-contact of the car in the overtaking lane.

Footnotes

(1) French Inter-ministerial Observatory of Road Safety, Road traffic accidents involving Injuries of: collection of raw data, ONISR, May 2013, p. 69

Acknowledgments

We would like to thank Cedric GOULON for his help in the preparation of the virtual setup.

III.2 Influence respective des *affordances MSV/Vmax* et *MSA/Amax* sur la prise de décision

III.2.1 Résumé de l'expérimentation 2

Introduction

Dans cette expérience, nous questionnerons la sensibilité du conducteur à des propriétés cinématiques telles que la vitesse et l'accélération maximale du véhicule conduit. Notre étude précédente (Morice et al., 2015) a démontré que les conducteurs réalisaient leur dépassement en fonction du ratio entre une propriété du système agent-environnement (i.e., la Vitesse Minimale Satisfaisante pour réussir le dépassement, *MSV*) et une propriété de l'agent (i.e., Vitesse maximale du véhicule conduit, *Vmax*). L'*affordance* de dépassement *MSV/Vmax* a ainsi été formalisée à partir de propriétés définies dans une unité de vitesse (m/s). Toutefois, dans la vie réelle les véhicules ne sont pas seulement bornés par une vitesse maximale mais également par une accélération maximale qui contraint la performance des conducteurs. Une telle limite d'action est, par exemple, essentielle dans la perception des possibilités de traverser une intersection en toute sécurité (Marti et al., 2015). Les possibilités de dépasser seraient contraintes à la fois par une vitesse maximale et une accélération maximale. Les conducteurs pourraient alors améliorer leur perception des possibilités de dépasser en s'appuyant non seulement sur la vitesse maximale mais également sur leur accélération maximale. En ce sens, nous postulons que la définition de l'*affordance* de dépassement peut être étendue au ratio entre l'accélération minimale satisfaisante pour réussir le dépassement (*MSA*) et l'accélération maximale du véhicule conduit (*Amax*). Cette nouvelle formalisation devrait ainsi enrichir la précédente en renseignant plus précisément les conducteurs sur leurs possibilités de dépasser.

Méthode

Afin de tester l'hypothèse selon laquelle les conducteurs percevraient préférentiellement une *affordance* de dépassement automobile formalisée à partir de propriétés d'intérêts définies dans une unité d'accélération, nous avons constitué deux groupes de dix conducteurs chacun. Le premier groupe possède une accélération maximale faible (*Amax* = 2 m/s²) et le second groupe dispose, quant à lui, d'une accélération maximale élevée (*Amax* = 3.5 m/s²). Dans chacune des

conditions expérimentales soumises aux conducteurs, la difficulté du dépassement est dépendante à la fois des cinq valeurs de *MSV* calculées à partir de la vitesse maximale des participants (*Vmax* = 35 m/s) et des quatre valeurs de *MSA* calculées à partir des accélérations maximales des participants. De plus, dans chaque essai, les conducteurs possédaient une vitesse initiale inférieure à la *MSV* initiale afin de permettre l'utilisation éventuelle de la *MSA*.

De ce fait, pour chaque condition de *MSV* et de *MSA*, les participants du groupe avec une accélération maximale élevée (*Amax* = 3.5 m/s²) devraient dépasser davantage que les participants du groupe avec une accélération maximale faible (*Amax* = 2 m/s). Par ailleurs, la manipulation des difficultés de dépassements liées à la *MSV* devrait avoir moins d'incidence sur le comportement de dépassement que la manipulation des difficultés de dépassement liées à la *MSA*.

Résultats

À l'aide d'une régression factorielle des courbes individuelles des fréquences de dépassement, nous avons mis en évidence une variation des fréquences de dépassement selon les capacités d'accélération maximales des véhicules conduits. Cette différence comportementale entre les groupes se produit lorsque les courbes psychométriques sont exprimées dans une échelle de mesure extrinsèque (i.e., en fonction de *MSV* et de *MSA*). En d'autres termes, le groupe de conducteurs avec une accélération maximale élevée (*Amax* = 3.5 m/s²) double plus fréquemment que le groupe de conducteurs possédant une accélération maximale faible (*Amax* = 2 m/s²). À l'inverse, lorsque les fréquences de dépassement sont exprimées dans une échelle de mesure intrinsèque (i.e., en fonction des ratios *MSV/Vmax* et *MSA/Amax*), les analyses statistiques effectuées sur les coefficients de la régression factorielle ne permettent plus de conclure à l'existence de différences significatives entre les groupes de conducteurs.

Par ailleurs, une régression linéaire multiple est effectuée sur les moyennes individuelles des fréquences de dépassement en combinant *MSA/Amax* avec plusieurs prédicteurs possibles : *MSV/Vmax*, *Vs*, *(MSV-Vs)/Ts* et *Ts*, défini comme le temps pour atteindre la *MSV*. Nous avons ainsi pu quantifier le poids de chaque couple de prédicteurs dans le modèle de dépassement automobile à l'aide des R^2 ajustés. Conformément à notre hypothèse, l'*affordance MSA/Amax* est préférentiellement perçue par les conducteurs quels que soient les prédicteurs

associés : en moyenne, 76.4% des fréquences de dépassement sont expliquées par la nouvelle *affordance* de dépassement *MSA/Amax*. Toutefois, de façon inattendue, le couple *MSA*/*Amax* et *Ts* explique significativement le comportement de dépassement, à l'instar du couple *MSA*/*Amax* et *MSV*/*Vmax*.

Discussion

Conformément à la théorie des *affordances* (J. J. Gibson, 1986) et à l'*affordance-based control* (Fajen, 2007a), les résultats comportementaux obtenus mettent en évidence la capacité des conducteurs automobiles à agir dans leur dépassement en considérant à la fois les capacités de vitesse maximales (i.e., *Vmax*) et d'accélération maximales (i.e., *Amax*) de leur véhicule. Toutefois, les résultats de la régression linéaire multiple mettent en évidence une utilisation préférentielle de l'*affordance* de dépassement (i.e., *MSA/Amax*), quels que soient les groupes de conducteurs. Cette utilisation préférentielle pourrait s'expliquer par un principe de sécurité (de Rugy, Montagne, Buekers, & Laurent, 2001) puisque la priorité est accordée à l'*affordance MSA/Amax* qui renseigne à la fois plus précisément et plus précocement le conducteur sur la faisabilité du dépassement. Dans l'intérêt du conducteur, il serait donc préférable de percevoir cette dernière. Par ailleurs, la sensibilité inattendue des conducteurs à la propriété *Ts*, traduite par son poids dans la régression du comportement de dépassement, pourrait s'expliquer par sa capacité à informer le conducteur des contraintes temporelles du dépassement et de ce fait de la possibilité d'accéder ou non à la *MSA* lorsque les contraintes temporelles sont sévères. En d'autres termes, la propriété temporelle *Ts* renseignerait le conducteur sur la marge de sécurité dont il dispose pour rejoindre *MSA* dans des conditions où le degré de liberté du conducteur est très faible, c'est-à-dire où *MSA* est très proche des limites d'action. Cette nouvelle propriété permettrait donc au conducteur de choisir un mode d'action pertinent. Lors de cette expérimentation, nous avons ainsi pu formaliser une nouvelle *affordance* de dépassement et confirmer la validité de la théorie des *affordances* (J. J. Gibson) ainsi que sa formalisation mathématique (Warren, 1984). Enfin, les résultats obtenus étendent ceux de Morice et al. (2015) en démontrant que les conducteurs sont non seulement sensibles à leur vitesse maximale mais également à leur accélération maximale pour percevoir les possibilités de dépasser, en accord avec le cadre théorique des *affordances* (Fajen, 2007a).

III.2.2 Manuscrit de l'expérimentation 2

High and low order overtaking-ability affordances: Drivers rely on the maximum velocity and acceleration of their cars to perform overtaking maneuvers

Numa BASILIO, Antoine H.P. MORICE, Geoffrey MARTI, and Gilles MONTAGNE

Aix-Marseille Université, CNRS, ISM UMR 7287, 13288, Marseille cedex 09, France

Objective: Do drivers take into account the action boundaries of their car when overtaking?

Background: The Morice et al. (2015) affordance-based approach to visually guided overtaking suggests that the "overtake-ability" affordance can be formalized as the ratio of the "minimum satisfying velocity" (*MSV*) of the maneuver to the maximum velocity (V_{max}) of the driven car. This definition however, ignores the maximum acceleration of the vehicle. We hypothesize that drivers may be sensitive to an affordance redefined with the ratio of the "minimum satisfying acceleration" *(MSA)* to the maximum acceleration (A_{max}) of the car.

Method: Two groups of nine drivers drove car differing in their Amax. They were instructed to attempt overtaking maneuvers in 25 situations resulting from the combination of five *MSA* and five *MSV* values.

Results: When overtaking frequency was expressed as a function of *MSV* and *MSA*, maneuvers were found to be initiated differently for the two groups. However, when expressed as a function of MSV/V_{max} and MSA/A_{max}, overtaking frequency was quite similar for both groups. Finally, a multiple regression coefficient analysis demonstrated that overtaking decisions are fully explained by a composite variable comprising MSA/A_{max} and the time required to reach *MSV*.

Conclusion: Drivers reliably decide whether overtaking is safe (or not) by using low and high order variables taking into account their car's maximum velocity and acceleration respectively, as predicted by "affordance-based control" theory.

Application: Potential applications include the design of overtaking assistance, which should exploit the MSA/A_{max} variables in order to suggest perceptually relevant overtaking solutions.

Keywords: Driving; Overtaking; Affordance; Acceleration; Virtual reality

Précis: We study overtaking in a virtual reality situation from the perspective of affordance theory, and show that drivers perceive overtaking opportunities on a scale that takes into account their car's maximum velocity and acceleration.

INTRODUCTION

In France, failed overtaking maneuvers are responsible for 21.5% of fatal accidents ("National Interministerial Observatory for Road Safety," 2011). Similar, alarming observations have been made in other countries (DEKRA, 2013; Duivenvoorden, 2010). The large number of fatalities has motivated the launch of prevention plans (The United Kindgom Royal Society for the Prevention of Accidents, 2009), modifications to legislation (Williams & Preusser, 1997) or development of Advanced Driver Assistance Systems (Hegeman, Brookhuis, & Hoogendoorn, 2005; Hegeman, van der Horst, Brookhuis, & Hoogendoorn, 2007; Jamson, Chorlton, & Carsten, 2012; Milanes et al., 2012). However, for maximum efficiency, such preventive measures must be accompanied by a better understanding of the underlying human factors and the perceptual processes used by drivers to identify safe overtaking conditions. To this aim, we investigate whether drivers are sensitive to their vehicle's maximum velocity and acceleration while overtaking.

Affordance-based models (Fajen, 2005b, 2007a) provide a framework that makes drivers' sensitivity to the kinematic limits of their car crucial for the perception of overtaking situations. For example, the "shrinking gap" problem (Fajen & Matthis, 2011) shows that subjects attempting to pass safely through a moving gap rely on a variable that specifies (in intrinsic units) their minimum locomotor speed. This study led us to formalize the minimum speed necessary to safely overtake a lead car while avoiding oncoming traffic (Morice et al., 2015). In virtual reality, we manipulated independently the "minimum satisfying velocity" (*MSV*) allowing to safely overtake the lead car and the maximum velocity (V_{max}) of the driver's car. When $MSV/V_{max} \leq 1$, it was physically possible to overtake the lead car because the *MSV* was lower or equal to the maximum velocity of the driver's car (V_{max}); otherwise overtaking was not possible. We found that overtaking frequency decreased when the MSV/V_{max} ratio approached 1, and that overtaking frequency was not significantly affected by V_{max} provided that drivers' behavior was expressed as a function of the MSV/V_{max} ratio. Therefore, the MSV/V_{max} variable allows for perception of the safeness of overtaking maneuvers depending on the maximum velocity of the driven car. However, real life cars are not only bounded by a maximum velocity but also by a maximum acceleration that also constrains the performance envelope of a car as illustrated in Figure 27. Indeed, in combination to the maximum velocity (V_{max}), the maximum acceleration (A_{max})

determines the driver's field of possibilities (the "reachable states"). Such an action limit is for instance essential in the perception of crossing possibility while approaching an intersection (Marti, Morice, & Montagne, 2015; McKenna, 2004).

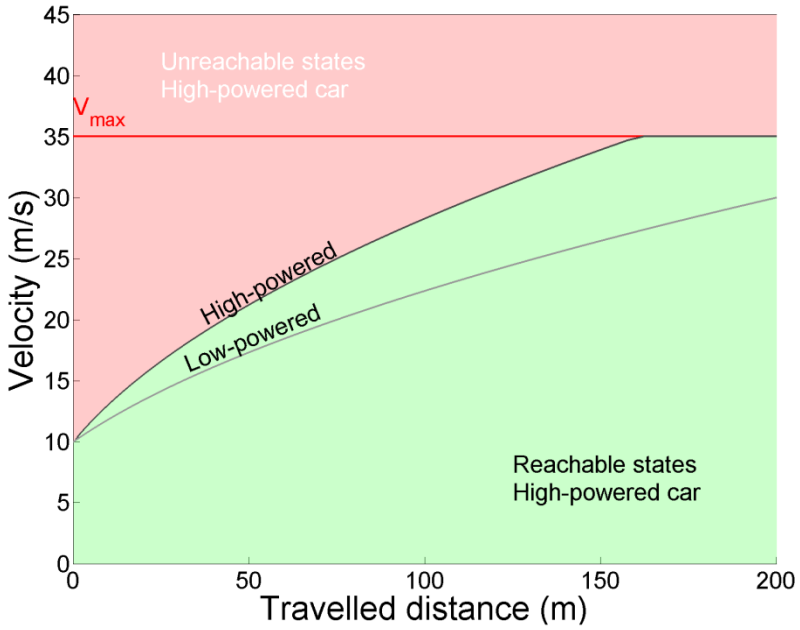


Figure 27. Numerical simulations of the performance state space for two accelerating cars as a function of maximal acceleration (A_{max} = 2 and 3.5 m/s² for *Low-Powered* and *High-Powered* cars, respectively) and maximal velocity (V_{max} = 35 m/s). The colored spaces partition the state space in terms of reachable and unreachable states for the high-powered car.

Both maximum velocity and maximum acceleration would therefore limit driver's overtaking possibilities. Indeed, as demonstrated by Morice et al. (2015), a larger V_{max} would offer drivers more opportunities to perform a safe overtaking maneuver. This last comment is illustrated in the upper row of Figure 28, showing numerical simulations of two cars constrained by different V_{max} (i.e., *Slow* and *Fast* cars), attempting to overtake a lead car moving at a constant velocity while avoiding to collide a stationary obstacle standing on the opposite lane. The panel B shows that *Slow* and *Fast* cars accelerate similarly from an initial velocity of 10 m/s to reach a higher *MSV*. When reaching its V_{max}, the *Slow* car stops accelerating and moves at a constant velocity, preventing it to catch *MSV*. This moment corresponds in panel A to the point from which *Slow* and *Fast* cars' trajectories diverge. From this moment onwards, the *Slow* car's trajectory is no more able to pass the lead car before reaching the stationary obstacle position.

Conversely, the *Fast* car benefits from more time to continue accelerating and reach *MSV* before exceeding V_{max}. This allows it to safely overtake the lead car. We hypothesize that, in parallel, the driver of a high-powered car would also benefit from a larger maximum acceleration as illustrated in the lower row of Figure 28. Indeed, if one considers the same initial velocity of 10 m/s, the larger the maximum acceleration (i.e., *high-powered* vs. *low-powered* car) the safer overtaking would be, regardless V_{max}, as *MSV* will be reached quicker (panel D). Hence, the car's maximum acceleration, in addition to the car's maximum velocity, determines drivers' overtaking opportunities.

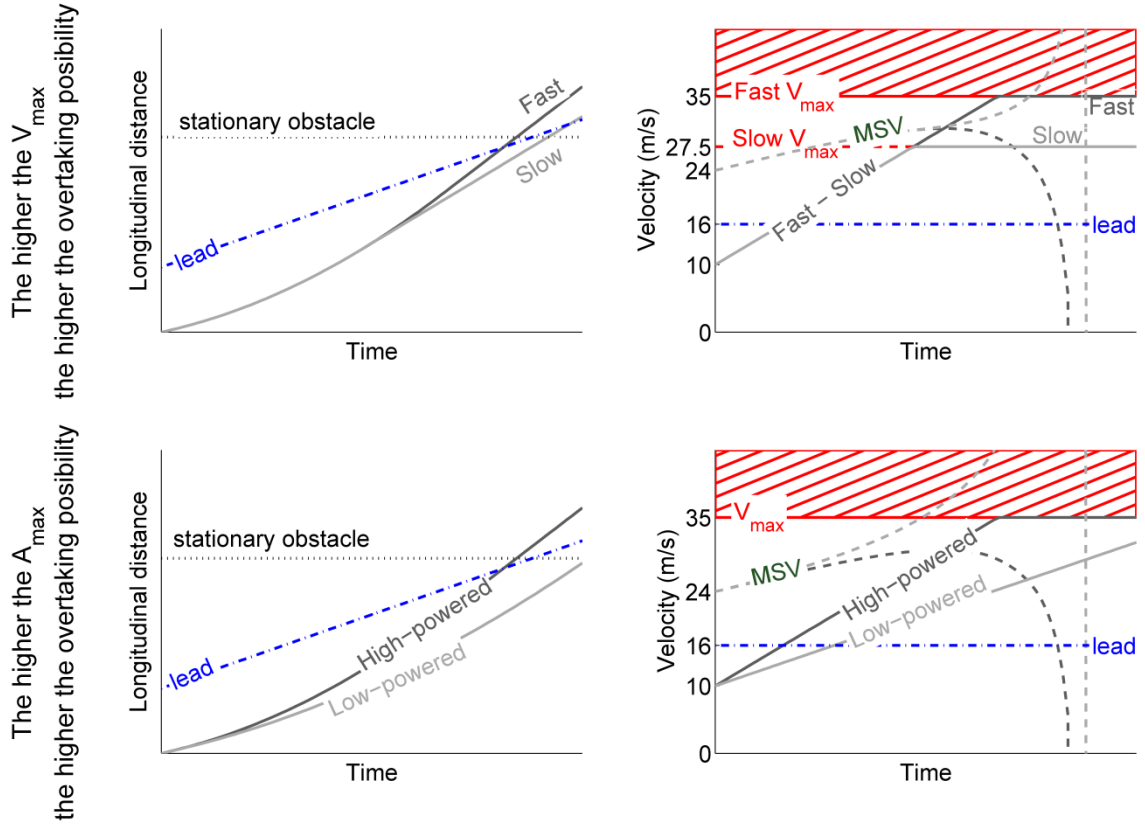


Figure 28. Position (left panels) and velocity (right panels) time-series for cars limited by different maximum velocity (*Vmax* = 27.5 and 35 m/s for *Slow* and *Fast* cars, respectively; upper row) and acceleration (*Amax* = 2 and 3.5 m/s² for *Low-Powered* and *High-Powered* cars, respectively; lower row). *Fast* and *High-Powered* cars offer safer overtaking possibilities than *Slow* and *Low-Powered* vehicles.

Drivers would take advantage from relying on maximum acceleration in addition to maximum velocity to improve their perception of overtaking possibility. We therefore hypothesize that the definition of the *overtake-ability* affordance should be extended by scaling the minimum satisfying acceleration (*MSA*), required to accelerate from the current velocity to the minimum satisfying velocity (*MSV*) before it exceeds the maximum velocity of the car (V_{max}), by the maximum acceleration of the vehicle being driven (A_{max}). The MSA/A_{max} ratio would thus be an enriched property with regards to $MSV/V_{max,}$ reflecting better the car's action possibility.

Experiment

This experiment investigated overtaking in an affordance-based framework. Using a virtual reality scenario, we tested the hypothesis that drivers perceive overtaking affordances by perceiving the MSA/A_{max} ratio.

If drivers are sensitive to V_{max} only, they are expected to overtake in any situation where $MSV/V_{max} \leq 1$, whatever the MSA/A_{max} ratio. If drivers are sensitive to A_{max}, they will decide to overtake only in situations where $MSA/A_{max} \leq 1$ (including conditions where $MSV/V_{max} \leq 1$).

METHOD

Participants

Eighteen volunteers (13 men and 5 women) were divided into two mixed-gender groups. Their average age was 22.84 years (*SD* = 2.63 years) and all had normal or corrected-to-normal vision. All participants held a valid driving license and had an average of 3.58 years' driving experience (*SD* = 2.24 years). The experimental protocol was approved by the local ethics committee. Participants were not told the purpose of the study.

Task

Drivers were asked to perform overtaking maneuvers, if deemed possible. They were free to accelerate or brake by using appropriate pedals. They controlled the initiation of lateral excursions between lanes (an overtaking maneuver) by turning the steering wheel over ± 30°: a

counterclockwise turn moved the car from the right to the left lane, whereas a clockwise turn moved the car in the opposite direction. Feedback about the speed of the vehicle was provided by optic flow and engine noise; speedometer was not displayed.

Apparatus

Figure 29 illustrates the fixed-base driving simulator. Participants sat in a playseat (Mobsim, France); they manipulated two pedals (Trackstar 6000 GTS) with their right foot, and used their hands to turn a steering wheel (ECCI, Trackstar 6000 GTS). The data from the pedals and steering wheel were sent to a computer, and OpenGL-based software controlled the motion of the virtual car on-line. From the driver's viewpoint, the virtual scene was rendered as two 800 × 600 pixels stereoscopic images refreshed at 75 Hz in a head-mounted display (Hi-res 900 stereo, Cybermind Corp). An electromagnetic tracking system (Flock of Birds, Ascension Technology Corp.) was used to enslave the virtual scene to driver's head rotations from a fixed observation point (0.975 m above ground level, at the center of the driver's playseat). The driver could display side or/and center rear-view mirrors in the virtual scene by holding dedicated buttons. Mirrors were sized and located realistically relative to the virtual car so as to allow drivers, if deemed comfortable, to fixate the visual content of mirrors while controlling the surrounding driving environment in peripheral vision.

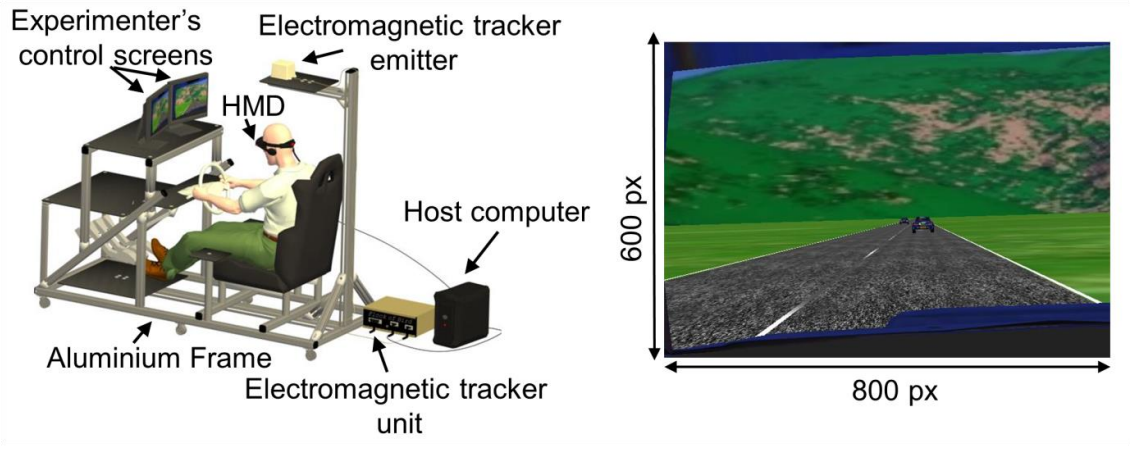


Figure 29. (Left) Overview of the virtual reality set-up. Participants wearing a head-mounted display sat on a playseat. (Right) Typical screenshot of the virtual scene prior to an overtaking maneuver, including two 3.5 m wide lanes, two 4.415 m long × 1.740 m wide × 1.475 m high cars, respectively acting as an obstacle and a lead car, and the landscape. At the trial start, obstacle and lead cars optical diagonal sizes were equal to 0.57 and 1.77°, respectively.

Procedure

Participants initially performed 20 practice trials to familiarize themselves with the task. Each trial began with an initial phase during which the virtual car was moved by the computer at a velocity V_s (see next subsection and Table 3) and a 0 m/s² acceleration until it crosses the starting line. From this point, a lead and a stationary obstacle vehicle appeared on the right and left lane respectively, and drivers were free to control their acceleration and position using the pedals and steering wheel. The experiment lasted approximately two hours.

Independent variables / Design

We manipulated the maximum acceleration of the virtual car (A_{max}) as a between-group variable. Participants were assigned to either a *Low-powered* (A_{max} = 2 m/s²), or a *High-powered* (A_{max} = 3.5 m/s²) virtual car. These values were respectively based on the maximum acceleration in second gear of a Fiat Cinquecinto 0.9 and a Subaru Impreza WRX 2009 (Glenn, 2013). The maximum velocity (V_{max} = 35 m/s) was constant between groups. The appearance and size of the driver's car was constant between groups (4.415 m long × 1.740 m wide × 1.475 m high).

We manipulated the minimum satisfying velocity (*MSV*) as a within-participant variable with five values ranging from 21 to 38.5 m/s in 4.375 m/s increments for both the *Low-powered* and *High-powered* groups. The five *MSV* conditions were set by maintaining the lead car's velocity (V_L) at a constant value equal to (*MSV*/1.5) where 1.5 is the ratio of the distance between the driver's car and the obstacle car, to the lead and the obstacle car (see Table 3). The initial positions of the lead (75 m) and obstacle (224.5 m) cars relative to the participant's car on the road-longitudinal axis were constant between trials and so were their visual appearance and size.

MSV was calculated as the quotient of the length of the trajectory required by the driver's car to safely overtake (d_s), and the time until the lead car jeopardized the overtaking maneuver ($t_{overtaking}$) and was formalized as (1):

$$MSV = d_s / t_{overtaking} \quad (1)$$

We also manipulated the minimum satisfying acceleration (*MSA*) at the start of each trial as a within-participant variable with five values ranging from 0.5 to 2.5 m/s² in 0.5 m/s²

increments (for the *Low-powered* group) and from 0.875 to 4.375 m/s² in 0.875 m/s² increments (for the *High-powered* group). *MSA* was computed as the minimum acceleration required to reach *MSV* (before reaching V_{max}). *MSA* was adjusted by manipulating the initial velocity (V_S, in m/s) of the participant's car (from 18.32 to 35 m/s and 16.31 to 35 m/s for the *Low-powered* and *High-powered* groups, respectively) and the lead car's velocity (V_L, in m/s). This changed the time required to reach the *MSV* when adopting the *MSA* (T_s, in *s*, see Table 3 and Figure 30). *MSA* was calculated as follows (2):

$$MSA = -\left(V_{\max} - V_S\right)^2 \Big/ \left[2 \cdot \left(d_s - V_{\max} \cdot \frac{d_L}{V_L}\right)\right] \quad \textbf{(2)}$$

Since *MSA* already included the V_{max} and the *MSV* variables, MSA/A_{max} can thus be considered as a "higher-order" property, and MSV/V_{max} as a "lower-order" one. Such a label is inspired from the "higher-order/lower-order" appellation of perceptual variables found in the direct perception theory literature. First, MSA/A_{max} would allow drivers to better identify overtaking opportunities since $MSV/V_{max} < 1$ becomes a necessary but insufficient condition to guarantee safe overtaking. Second, MSA/A_{max} would allow identifying more rapidly overtaking opportunity. Numerical simulations based on 75% of initial velocity revealed that in all of our experimental conditions *MSA* exceeded A_{max} earlier (3.11 and 2.23s on average for A_{max} corresponding to the *low-* and *high-powered* vehicle, respectively) than *MSV* exceeded V_{max} . Perceiving the MSA/A_{max} ratio would thus allow drivers to save time, at least for short range overtaking and small initial velocity (Figure 30).

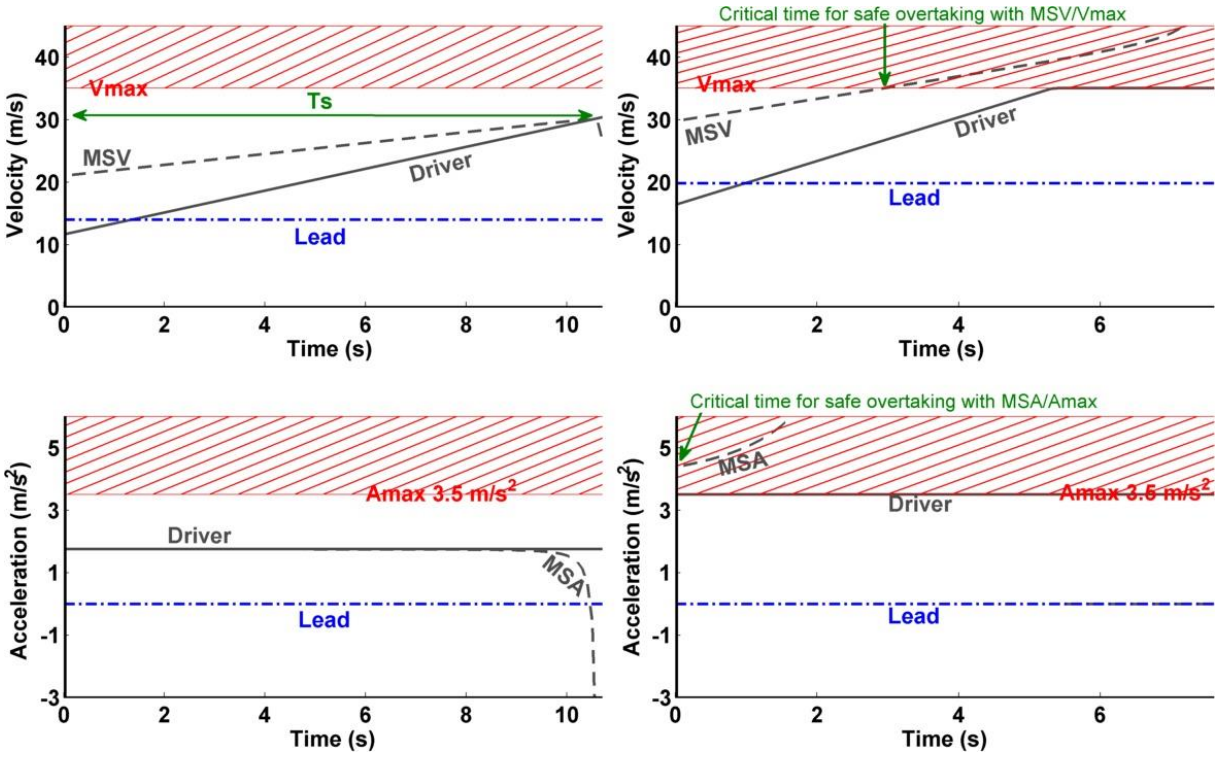


Figure 30. Time course of velocities (upper panels) and acceleration (lower panels) for two overtaking conditions (60% *MSV*/*Vmax* and 50% *MSA*/*Amax*, left panels, and 85% *MSV*/*Vmax* and 125% *MSA*/*Amax*, right panels). Overtaking is affordable in both conditions based on *MSV*/*Vmax* but only in the first condition based on *MSA*/*Amax*. *MSA*/*Amax* would therefore be a higher order property than *MSV*/*Vmax*, allowing earlier perception of critical time for safe overtaking.

Note that *MSV* and *MSA* values were selected in order to make overtaking opportunities identical for both groups. MSV/V_{max} and MSA/A_{max} ratios were identical for the two groups, namely: 25, 50, 75, 100 and 125% for MSA/A_{max} and 60, 72.5, 85, 97.5 and 110% for MSV/V_{max} (see Table 3). These conditions were repeated five times in random order for each participant resulting in 125 experimental trials (5 *MSV* conditions × 5 *MSA* conditions × 5 repetitions). Conditions where the MSV/V_{max} and MSA/A_{max} ratio equaled 100% corresponded to the theoretical maximum overtaking opportunity. Hence, 80 of the 125 trials (64%) could result in successful overtaking maneuvers.

For each participant, two lure trials during which another car overtook the participant's car were randomly included. This discouraged the driver from systematically initiating an overtaking maneuver at the start of the trial without checking their rear-view mirror.

Table 3: Overview of experimental conditions and dependent variables according to independent variables manipulated. Gray cells indicate that overtaking was not possible.

All groups (V_{max} = 35 m/s)				**Low-powered (A_{max} = 2 m/s²)**			**High-powered (A_{max} = 3.5 m/s²)**		
V_L (m/s)	MSV (m/s)	MSV/V_{max} (%)	MSA/A_{max} (%)	V_S (m/s)	T_s (s)	MSA (m/s²)	V_S (m/s)	T_s (s)	MSA (m/s²)
14	21	60	25	18.32	10.69	0.50	16.31	10.69	0.87
			50	15.64	10.69	1.00	11.63	10.69	1.75
			75	12.96	10.69	1.50	6.94	10.69	2.62
			100	10.34	10.69	2.00	2.68	9.26	3.50
			110*	7.61	10.69	2.50	1.02	8.28	4.37
16.92	25.375	72.5	25	23.16	8.85	0.50	21.50	8.85	0.87
			50	20.94	8.85	1.00	17.62	8.85	1.75
			75	18.73	8.85	1.50	13.83	8.06	2.62
			100	16.55	8.85	2.00	10.68	6.98	3.50
			125	14.34	8.26	2.50	7.67	6.25	4.37
19.83	29.75	85	25	27.86	7.54	0.50	26.44	7.54	0.87
			50	25.97	7.54	1.00	23.21	6.74	1.75
			75	24.09	7.28	1.50	20.56	5.50	2.62
			100	22.43	6.30	2.00	18.37	4.76	3.50
			125	20.91	5.64	2.50	16.36	4.26	4.37
22.75	34.125	97.5	25	32.60	4.80	0.50	31.82	3.63	0.87
			50	31.60	3.40	1.00	30.51	2.57	1.75
			75	30.84	2.77	1.50	29.50	2.10	2.62
			100	30.20	2.40	2.00	28.65	1.82	3.50

			125	29.63	2.15	2.50	27.90	1.62	4.37
25.67	38.5	110	+inf**	35.00	-inf	0.50	35.00	-inf	0.87
			+inf**	35.00	-inf	1.00	35.00	-inf	1.75
			+inf**	35.00	-inf	1.50	35.00	-inf	2.62
			+inf**	35.00	-inf	2.00	35.00	-inf	3.50
			+inf**	35.00	-inf	2.5	35.00	-inf	4.37

Note : Shaded cells indicate that overtaking was not possible. V_{max} = maximum velocity; A_{max} = maximum acceleration; V_L = lead car's velocity; *MSV* = minimum satisfying velocity; *MSA* = minimum satisfying acceleration; V_S = initial velocity; T_S = time required to reach the *MSV* when adopting the *MSA*; Inf = infinite value.
*Such a configuration required the initial velocity of the participant's car to be −1.22 m/s to get a MSA/A_{max} ratio of 125%. As a negative velocity makes no sense in an overtaking situation, we decided to set the initial velocity to 1.02 m/s to reach the maximum theoretical MSA/A_{max} ratio (110%) while still making overtaking impossible.
** The MSA/A_{max} cannot be computed as the driver is bounded by V_{max}.

Dependent variables

For each trial we recorded collisions between the participant's car and either the lead or obstacle cars and also identified the maneuver selected by each participant: overtaking, bailing out, and following. Collisions were then categorized depending on the maneuver in progress at the moment of their occurrence. Collisions during overtaking maneuver were defined as collisions occurring after the driven car has passed the lead car, namely when cutting in the trajectory of the lead car or colliding the obstacle car. Collision during bailing out (namely, during a lateral excursion from the left to the right lane) and following maneuvers resulted exclusively in a crash into the lead. The collision frequency and overtaking frequency (both successful maneuvers and maneuvers that resulted in collision) were calculated for each participant and each condition. A frequency of 100% indicates that the overtaking maneuver succeeded in each of the five trials for a given condition.

Statistics

Our initial analyses aimed to find whether collisions were caused by a reliance on any of the experimental factors. Therefore, a three-way mixed-design ANOVA was performed on

collision frequency induced by overtaking maneuvers using A_{max} as the independent variable (two modalities: *Low-powered* and *High-powered*) and repeated measures on MSV/V_{max} (four modalities, ranging from 60 to 97.5% in 12.5% increments) and MSA/A_{max} (five modalities, ranging from 25 to 125% in 25% increments). Data from trials where MSV/V_{max} was equal to 110% were excluded from the analyses since the corresponding MSA/A_{max} values were always *+inf*. Individual percentages of collision frequency in conditions that showed no within-participants variance (i.e., conditions for which no participant was found to collide with surrounding vehicles) were replaced by random values ranging from 0 to 1 (whereas frequency ranged from 0 to 100% in other conditions). This occurred during one condition (MSV/V_{max} = 60% × MSA/A_{max} = 25%) for the analysis of collision frequency.

Secondly, we analyzed whether drivers in the *Low-powered* and *High-powered* groups initiated similar overtaking maneuvers as a function of the MSA/A_{max} ratio. Individual overtaking frequencies were fitted (using factorial regression) by adjusting the coefficients *a–d* in the function defined by (3) :

$$f(x,y) = a \cdot x + b \cdot y + c \cdot x \cdot y + d \quad \textbf{(3)}$$

in which *f(x,y)* corresponds to the probability of observing an overtaking maneuver, *x* is either *MSV* or MSV/V_{max} and *y* is either *MSA* or MSA/A_{max}. In this equation, the coefficients *a* and *b* express a proportional influence of *x* and *y* on overtaking frequency; *c* reflects the *x* × *y* interaction and *d* is a constant that acts as a vertical offset modulating the average frequency of overtaking maneuvers. These adjustments were used to determine which of the coefficients *a–d* varied as a function of A_{max}. Separate one-way independent group ANOVAs (A_{max}) were then performed on individual *a–d* coefficients (expressed as a function of *MSV* and *MSA*) in order to quantify between-group differences in the selection of overtaking maneuvers. In addition, separate one-way ANOVAs (A_{max}) were performed on individual *a–d* coefficients expressed as a function of MSV/V_{max} and MSA/A_{max} to test the hypothesis that behavior was similar across groups when *MSV* and *MSA* were expressed as a ratio of V_{max} and A_{max}, respectively.

Finally, a three-way mixed-design ANOVA was performed on overtaking frequency, using A_{max} as the independent variable and repeated measures on MSV/V_{max} and MSA/A_{max}. Moreover, multiple regressions were carried out on various combinations of variables based on their assumed influence on the success of an overtaking maneuver. For all statistical analyses, *p*

was 0.05. Data from lure trials in which another car overtook the participant's car at the beginning of the trial were excluded from all analyses. Individual percentages of overtaking frequency in conditions that showed no within-participants variance (i.e., conditions for which no driver was shown to perform an overtaking maneuver) were replaced by random values ranging from 0 to 1. This occurred during three conditions (MSV/V_{max} = 60, 72.5 and 85% × MSA/A_{max} = 125%) for the analysis of overtaking frequency. For all tests, partial effect sizes were computed (η^2_p) and post-hoc comparisons were conducted using Newman-Keuls a posteriori tests.

RESULTS

Collisions

Our first hypothesis assumed that if drivers do perceive an overtaking affordance, they would only initiate the maneuver when overtaking is possible. Drivers in the *Low-powered* and *High-powered* groups collided with surrounding cars in 15.8% and 14.4% of trials, respectively. Among them, the small percentage of collisions resulting from overtaking attempts (2.84 and 3.56% of trials for the *Low-powered* and *High-powered* groups, respectively) tended to confirm that participants could accurately distinguish whether the situation allowed safe overtaking or not. Collisions most frequently occurred during bailing out maneuvers (11.20 and 10.04% for the *Low-powered* and *High-powered* groups, respectively), when drivers hastened their return to the right hand lane while colliding the left side of the lead car. Collisions infrequently occurred during following maneuvers (1.78 and 0.8% for the *Low-powered* and *High-powered* groups, respectively), when driver crashed into the lead car rear bumps.

Our second hypothesis was that the exclusive use of MSV/V_{max} without care of MSA/A_{max} would lead drivers to initiate unsafe overtaking maneuvers. Specifically, they would decide to overtake when MSV/V_{max} indicated a safe overtaking opportunity (e.g., MSV/V_{max} equal to 97.5%), while at the same time MSA/A_{max} (e.g., MSA/A_{max} equal to 125%) indicated that overtaking was unsafe. A three-way ANOVA (A_{max} × MSV/V_{max} × MSA/A_{max}) with repeated measures on MSV/V_{max} and MSA/A_{max} was performed on the frequency of collisions resulting from overtaking maneuvers. This ANOVA revealed a significant MSV/V_{max} × MSA/A_{max} interaction ($F(12,192) = 1.98$; $p < 0.05$; $\eta^2_p = .11$). Newman-Keuls post-hoc analyses showed that collisions occurred significantly more frequently in a small, specific set of conditions where

MSA/A_{max} was equal to 50 or 100% and *MSV*/V_{max} was equal to 97.5% (collision frequency equal to 13.33 and 20% for the *Low*- and *High-powered* groups, respectively; $p < 0.05$). No significant differences were found in other *MSV*/V_{max} conditions for which *MSA*/A_{max} was superior to 100% (collision frequency equal to 1.67 and 1.67%; $p > 0.05$). Whereas a large number of collision - especially in conditions where *MSA*/A_{max}>1 - would indicate that drivers randomly attempted to perform overtaking maneuver, our results led us to conclude that participants avoid collisions by perceiving overtaking opportunities on the basis of the *MSA*/A_{max} ratio.

Overtaking frequency

Our third hypothesis was that if drivers rely on *MSA*/A_{max} overtaking frequency would vary as a function of *MSA* and A_{max}.

Figure 31A shows average overtaking frequencies plotted as a function of *MSA* and *MSV* manipulations for the *Low-powered* (black surface) and *High-powered* groups (gray surface), respectively. As expected, overtaking frequency decreased with increases in *MSA* for both groups of drivers but also unexpectedly with increase of *MSV*. In addition, overtaking frequency seemed to overlap for both groups on the *MSV* but not the *MSA* axis. The absence of overlap on the *MSA* axis is indicated by the double-headed arrow. This finding not only confirms that drivers changed the way they initiated overtaking maneuvers as a function of *MSV*/V_{max}, as already evidenced, but most importantly suggests that they were also sensitive to *MSA* and A_{max}.

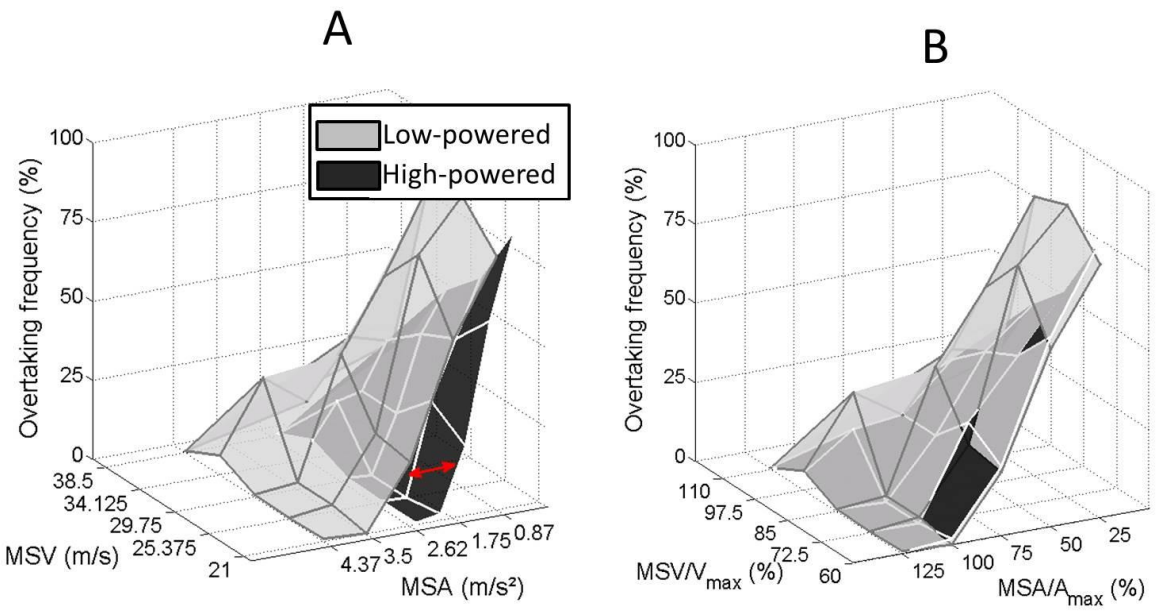


Figure 31. Average frequency of overtaking maneuvers plotted as a function of *MSV* and *MSA* (panel A), and *MSV/Vmax* and *MSA/Amax* (panel B) for the Low-powered (black) and High-powered (gray) groups.

We then fitted overtaking frequency with equation (3) using *MSV* and *MSA* as predictors. Individual adjustments led to average R^2 values equal to 0.76 and 0.71 for the *Low-powered* and *High-powered* groups, respectively.

Table 4. Average inter-individual values of the best a–d coefficients used to fit individual overtaking frequency as a function of *MSA* and *MSV* and *MSA/Amax* and *MSV/Vmax*. Significant differences between-group are indicated by asterisks.

Predictors / **Coefficient**	***MSV* and *MSA***		
	Low-powered	**High-powered**	**F value, *p***
a (*MSV*)	19.10	-4.27	0.99, $p>0.05$
b (*MSA*)	-100.71	-62.57	14.87, $p<0.05$*
c (*MSV*×*MSA*)	2.38	1.41	7.58, $p<0.05$*
d (vertical offset)	58.21	67.02	0.09, $p>0.05$
Predictors / **Coefficient**	***MSV*/V_{max} and *MSV*/A_{max}**		
a (*MSV*/V_{max})	-1.57	-1.49	0.04, $p>0.05$
b (*MSA*/A_{max})	-2.01	-2.19	0.45, $p>0.05$
c ([*MSV*/V_{max}] ×[*MSA*/A_{max}])	0.02	0.02	0.04, $p>0.05$
d (vertical offset)	58.21	67.02	0.09, $p>0.05$

One-way ANOVAs (A_{max}) were performed separately on each of the coefficients to highlight the respective contribution of *MSA*, *MSV* and *MSV*×*MSA* in overtaking frequency as a function of group (cf. Table 4). These ANOVAs revealed no significant main effect of A_{max} on the coefficient *a* (F (1, 16) = 0.99; $p > 0.05$). The absence of between-group differences on *a* confirms that both groups, with the same V_{max}, responded in the same way to the manipulation of *MSV*. However, the ANOVA revealed a significant main effect of A_{max} on the coefficient *b* (F (1,16) = 14.87; $p < 0.05$; $\eta^2_p = 0.48$). The negative value of *b* for the *High-powered* group is lower than for the *Low-powered* group. This underlines that an identical increase in *MSA* resulted in a bigger decrease in overtaking frequency for the *Low-powered* than for the *High-powered*

group. The higher positive value of *c* for the *Low-powered* compared to the *High-powered* group also suggests that overtaking frequency was influenced by the *MSA* × *MSV* interaction as a function of group: $F(1, 16) = 7.58$; $p < 0.05$; $\eta^2_p = 0.32$. Hence, for a given *MSV* condition, the change in overtaking frequency as a function of *MSA* is more pronounced for the *Low-powered* than the *High-powered* group. These results show that, when expressed as a function of *MSV* and *MSA*, overtaking maneuvers are initiated differently as function of group (A_{max}).

Figure 31B shows a transformation of Figure 31A, in which each *MSA* and *MSV* condition was divided by A_{max} (2 and 3.5 m/s² for the *Low-powered* and *High-powered* groups, respectively) and V_{max} (35 m/s). It is important to note that overtaking frequency dropped to 0% for both groups when MSV/V_{max} and MSA/A_{max} exceeded 100% (i.e., when *MSV* and *MSA* required for successful overtaking were greater than the car's V_{max} and A_{max}). This suggests that drivers in both groups reliably perceived situations where overtaking requirements exceeded their car's capabilities. Moreover, the two overtaking frequencies surfaces overlap, suggesting that the groups behaved similarly for a given MSA/A_{max} ratio.

We then fitted individual overtaking frequencies with equation (3); in this case variance in overtaking frequency results from the influence of MSV/V_{max} and MSA/A_{max}. This analysis determined whether the between-group differences in overtaking frequency (due to the manipulation of *MSA*) found in earlier analyses vanished when MSA/A_{max} was taken into account.

One-way ANOVAs (A_{max}) were separately performed on *b* and *c* coefficients. These analyses highlighted the identical contribution of MSA/A_{max} and $MSV/V_{max} \times MSA/A_{max}$ interactions in overtaking frequency for both groups (cf. Table 4). ANOVAs revealed no significant effect of A_{max} on *b* and *c* (F (1, 16) < 0.45; $p > 0.05$; *ns*). These results confirm that between-group differences in overtaking frequency that are due to the manipulation of *MSA*, vanish when *MSA* is expressed as a scale that integrates A_{max}. Hence, the decision to overtake appears to be similar among groups when the overtaking affordance is expressed through MSA/A_{max} and MSV/V_{max} ratios.

While we predicted that between-group differences in overtaking frequency expressed as a function of *MSA* would vanish when expressed as a function of MSA/A_{max}, we did not expected between-group differences in coefficient that fit overtaking frequency due to the $MSA/A_{max} \times MSV/V_{max} \times A_{max}$ interaction. This effect can be seen in Figure 31, and was revealed by a three-way mixed-design ANOVA performed on individual values of overtaking frequency: F(12,192) =

2.52; $p < 0.05$; $\eta^2_p = 0.14$. Post-hoc analyses showed that the *High-powered* group overtook significantly more frequently in a small and specific set of conditions that combined MSA/A_{max} equal to 50 or 25% and MSV/V_{max} equal to 72.5% or 85% ($p < 0.05$), respectively.

We suspected that other, underlying, variables were the reason for these differences as MSV/V_{max} and MSA/A_{max} were identical for all groups. Separate multiple regression were performed for overtaking frequency, MSA/A_{max} and candidate variables (MSV/V_{max}, T_s, V_s, $MSV\text{-}V_s$, and $(MSV\text{-}V_s)/T_s$). Each of these variables relies on the driver's speed, and the combination of multiple variables allowed us to isolate those that were most relevant. The results of these analyses are summarized in Table 5.

Table 5. Results of multiple regressions between overtaking frequency, *MSA/Amax* (Predictor 1) and *Ts*, *Vs*, *MSV-Vs*, and (*MSV-Vs*)/*Ts* (predictor 2). Significant differences are indicated with asterisks.

Predictor 1	**F value, *p***	**Predictor 2**	**F value, *p***	**Adjusted R^2**
MSA/A_{max}	473.17, $p<.05$*	MSV/V_{max}	8.42, $p<.05$*	0.57
MSA/A_{max}	420.33, $p<.05$*	T_s	5.96, $p<.05$*	0.57
MSA/A_{max}	425.98, $p<.05$*	V_s	3.18, $p>.05$	0.57
MSA/A_{max}	251.15, $p<.05$*	$MSV\text{-}V_s$	0.01, $p>.05$	0.56
MSA/A_{max}	214.79, $p<.05$*	$(MSV\text{-}V_s)/T_s$	1.96, $p>.05$	0.56

The analyses revealed that overtaking frequencies were significantly correlated with two pairs of variables: $MSA/A_{max} + MSV/V_{max}$ and $MSA/A_{max} + T_s$, i.e., the time required to reach *MSV* starting from the current velocity by accelerating at *MSA* (see between-group changes in T_s in Table 3). As T_s was the only candidate variable that had a significant influence in the regression ($p < .05$), an adjusted R^2 that was as high as the initial variable MSV/V_{max} (0.57), and varied between group, we concluded that drivers seemed to combine MSA/A_{max} and T_s to accurately perceive overtaking opportunities. The combined influence of MSA/A_{max} and T_s on overtaking frequency could be the cause of the significant between-group differences in overtaking

frequency observed in Figure 31, and such an explanation was confirmed by three-way mixed-design ANOVAs ($MSV/V_{max} \times MSA/A_{max} \times A_{max}$) performed on overtaking frequency.

DISCUSSION

We investigated the reliability of a driver's decision to overtake (or not) in an effort to clarify the causes of overtaking accidents. In line with Morice et al. (2015), we hypothesized that drivers would safely overtake (or not) based on their perception of an overtake-ability affordance. However rather than using the maximum velocity of the driver's car (V_{max}) as a scale for perceiving the minimum satisfying velocity (*MSV*) needed to overtake the lead car, we extended the study of Morice et al. by hypothesizing that drivers would also rely on a more relevant capability: the maximum acceleration of their car (A_{max}). We predicted that drivers would use A_{max} to assess the minimum satisfying acceleration (*MSA*) required to accelerate from their current velocity to the *MSV* before reaching their car's V_{max}. We showed that driver's decision not only vary with MSA/A_{max}, but also (and unexpectedly) as a function of *Ts*. We discuss these results in the following sections.

Driver's sensitivity to MSA/A_{max}

We hypothesized that the perception of $MSV/V_{max} < 1$ was a necessary but insufficient condition to guarantee safe overtaking. We thus predicted that relying solely on MSV/V_{max} would lead drivers to make mistakes in estimating overtaking maneuvers. In particular, they would initiate overtaking maneuvers in situations in which $MSV/V_{max} < 1$, but there would be collisions with other vehicles in situations that combined $MSV/V_{max} < 1$ and $MSA/A_{max} > 1$. On the other hand, we anticipated that the perception of $MSA/A_{max} \leq 1$ was a necessary and sufficient condition to guarantee safe overtaking.

Our analyses of collisions revealed results that are consistent with the use of MSA/A_{max} as an affordance to initiate overtaking maneuvers. Collisions were infrequent and occurred in a few set of "risky" conditions (e.g., $MSV/V_{max} = 97.5$ and $MSA/A_{max} = 100\%$). This suggested that

drivers reliably distinguished safe from unsafe overtaking situations. The overall frequency of collisions in our study was similar to the frequency of collisions reported in real-world overtaking accident reports (Wilson & Best, 1982) and laboratory studies (Gordon & Mast, 1970; Gray & Regan, 2005).

Moreover, our analyses of overtaking frequencies confirm the use of MSA/A_{max}. Indeed, the frequency of overtaking consistently dropped to 0% when *MSV* and *MSA* exceeded V_{max} and A_{max}, respectively. Furthermore, both *Low-powered* and *High-powered* groups behaved quite similarly when overtaking frequencies were plotted as a function of MSV/V_{max} and MSA/A_{max}. Similar results were reported by Warren (1984), and Warren and Whang (1987) in the perception of aperture crossing and stair climbing possibilities. These studies showed that similarities in approach behavior (despite variation in shoulder width and leg length) were due to the scaling of the aperture and stairs by the body property in question. Here, similarities in overtaking behavior are due to the scaling of overtaking requirements to the actions capabilities V_{max} and A_{max}.

Why did drivers not rely entirely on MSA/A_{max}?

In our experiment, reaching *MSV* before it exceeded V_{max} was a necessary but not sufficient condition for a successful overtaking maneuver while reaching *MSA* before it exceeded A_{max} was a sufficient condition. In other words, MSA/A_{max} was a high-order affordance making MSV/V_{max} useless. Identical MSA/A_{max} ratios should thus lead expert drivers to perceive overtaking opportunities as identical, independently of MSV/V_{max}. However, we found an unexpected sensitivity to the time required for the car to reach *MSV* from its initial velocity (T_s). Drivers in the *High-powered* group seemed more likely to overtake than drivers in the *Low-powered* group, while overtaking opportunities were theoretically identical for both groups. Moreover, the three-way mixed-design ANOVA of overtaking frequencies revealed that they varied as a function of the $MSV/V_{max} \times MSA/A_{max} \times A_{max}$ interaction. Finally MSA/A_{max} and T_s were both found to be significant and to best predict overtaking frequencies among candidate variables. Since T_s is a property close to MSV/V_{max}, the results are consistent with the ones previously reported by Morice et al, maybe due to the tiny improvement of accuracy of MSA/A_{max} as compared to MSV/V_{max} for usual drivers.

The "higher-order" label of MSA/A_{max} was given in reference to perceptual variables that perfectly specify some physical properties (see Jacobs, Michaels, & Runeson, 2000 and; Michaels & de Vries, 1998 for smart demonstrations) because it perfectly inform drivers about their driving possibility. It was hypothesized to be opposed to the "lower-order" property *MSV/Vmax*, whose correlation with overtaking possibility decrease as overtaking distance and time decrease and when the necessity to accelerate increase. In theory, the affordance-based control framework (Fajen, 2007a) allows an infinite range of behaviors and chances of success provided that the "ideal" state remains below the action capability boundary. However, as the ideal state (*MSV* in our case) moves closer to the boundary (V_{max}), the number of possible behaviors decreases and temporal constraints increase. Therefore, if drivers do not have to perform large acceleration because they drive at a velocity close to *MSV* (as in the Morice et al. 2015), MSV/V_{max} co-varies with the number of possible behavior and informs quite accurately drivers about their overtaking possibility.

However, the present study required larger acceleration than in the Morice et al. (2015) to perform safe overtaking. Therefore, drivers may have relied on T_s as a lower-order estimation of the temporal constraints of the overtaking situation. In other words, drivers may have used T_s to perceive their degree of freedom to follow *MSA* and to determine their safety margin. In line with the affordance-based control framework, T_s thus enables drivers to quantify the "safe region" (Fajen, 2005b) in order to select and regulate the most appropriate action mode (e.g., overtaking, following, etc.) given the temporal constraints of the overtaking situation. Therefore, drivers may be in an intermediate step of perceptual learning in which they mix between higher-order and lower-order variables. Previous results indeed revealed that the dynamics of perceptual learning is quite fast but not instantaneous (Bastin, Fajen, & Montagne, 2010; Fajen, 2007b; Flach et al., 2011; McKenna, 2004). The introduction of an unbeknownst increase or decrease of maximum velocity and acceleration would thus be required. Such a methodology, in line with experimental evidence of rapid recalibration of agent to their maximum deceleration when braking (Fajen, 2007b) or maximum velocity when intercepting target (Bastin et al., 2010), would serve as an ultimate demonstration of participant level of calibration.

Limitations and Future Research

The present study refines the portrayal of the variables implied in the perception of the overtaking possibility with regards to the Morice et al. (2015) study. Nevertheless, the conclusions drawn need to be nuanced with regards to the following limits. We believe that some poor performances of the devices used (e.g., limited field of view and low resolution of the head mounted display) do not jeopardize the validity of this study, since it kept invariant the essence of real life visual world. On the contrary, some features of the virtual simulation used (e.g., unconventional operation of the steering wheel, stationary vehicle on the left-hand lane) may limit the generalizability to real passing behavior by generating for instance more collisions during bailing out maneuvers than in real driving or more 'risky' overtaking attempts than with speed fluctuations of the oncoming traffic, respectively. Finally, and maybe more importantly, the use of a fixed-base driving simulator may have weakened the possible bridge between the perceptual process evidenced in the present experiment and those used in natural environments. Indeed, it is noteworthy that visual and non-visual contributions may contribute to the perception of action-scaled affordances, as the minimum required velocity to pass through shrinking aperture (Fajen & Matthis, 2011). For instance, in real life overtaking, vestibular information may help drivers to retrieve from visual relative displacements of objects components due to their self-motion (stimulating the vestibular system) from those due to the movement of surrounding (e.g., lead) cars. Such a limitation should lead the researcher interested by practical issues associated with training and design, as well as keen on the understanding of decision-making process to be cautious with our results (Flach et al., 2011).

Demonstrating that depending on expertise drivers rely on the MSV/V_{max} and/or the MSA/A_{max} ratios when deciding to overtake or-not is the first pre-requisite to evidence that drivers perceive an overtaking-ability affordance. A second step in the experimental affordance-based approach of overtaking would consist in identifying the source of information that supports the overtake-ability affordance. This would be in line with the agenda followed by previous research on body-scaled affordances (Warren & Whang, 1987) and action-scaled affordances (Fajen, 2005b; Fajen & Matthis, 2011). We believe that perceiving the overtake-ability cannot result from a separate perception of MSA and A_{max} followed by a comparison between them. Indeed, such process would first imply for the agent to be sensitive to an acceleration (i.e., the MSA) or a

differential between velocities, but the poor ability of the human perceptual system to reliably detect acceleration (Watamaniuk & Heinen, 2003; Werkhoven, Snippe, & Toet, 1992) discredit such strategy. Perceiving the overtake-ability through comparison between separate perception of *MSA* and *Amax* values would secondly disavow the main affordance hypothesis assuming that action boundaries provide critical references for perceiving directly possibility for action. We thus suggest that *MSA* is perceived directly in units of A_{max}. When properly calibrated, sources of information about *MSA* should indicate to drivers the percentage of A_{max} necessary to safely overtake. Our definition of the overtaking-ability affordance (*MSA* required to accelerate from the current velocity to the *MSV* before it exceed V_{max} scaled by A_{max}) is expected to provide a starting point and landmarks for identifying candidate perceptual information's that drivers could use to perceive MSA/A_{max}. Indeed, perceptual support of properties analog to *MSV* for successful interception (Bastin et al., 2010) and passing through aperture (Fajen & Matthis, 2011) exist, based on optical specifications of passing distance, time-to-passage and current speed. The optical specification of *MSA* however remains to be identified.

To be fully consistent with real life overtaking behavior, future research should investigate drivers' ability to exploit changes in their action limits when changing gear. Are drivers able to be aware that the current gear, unlike the lower gear, is unable to provide enough A_{max} to reach *MSA* and decide to activate a lower gear in order to successfully perform a safer overtaking maneuver? In the same vein, it would be interesting to investigate drivers' ability to calibrate with changes in their maximum acceleration not only with gear changes but also with the velocity changes for a given gear.

Practical implications

Conceiving Advanced Driver Assistance System (ADAS) dedicated to overtaking maneuvers is a concern nowadays. Their common principle consists in helping the driver to judge whether a gap will be safe enough for overtaking. However, few devices exist and most studies are limited to task analysis and numerical simulation of controller behavior (Arvind Raj, Dinesh, Manish, & Sasikala, 2013; Barańska, 2010; Hegeman, Tapani, & Hoogendoorn, 2009). To our knowledge, the few completed prototypes rely on road features (e.g., road curvature, legal

overtaking restrictions, speed limits) and actions limits (e.g., driver's car maximum velocity and sometime a maximum "comfortable" acceleration) but ignore the obstacle traffic (Loewenau et al., 2006; Milanes et al., 2012; Naranjo, Gonzalez, Garcia, & de Pedro, 2008). Oppositely, when taking into account the oncoming traffic, they use a behavioral database and pre-programmed threshold (Barańska, 2010; Hegeman et al., 2009) to compute the spatio-temporal constraints and remains at the step of simulations (Ruiz, Gil, Naranjo, Suárez, & Vinagre, 2007; Yang & Zhou, 2008).

We believe that the effectiveness of ADAS for overtaking relies on the coherence of the solution with human perception. Individuals must agree with the recommendations of the device (Wiener, 1981) rather than trying to get round it (Stanton & Pinto, 2001). Therefore, if future devices are to be fully efficient they must rely on the same perceptual variables as those used by humans, albeit with more sensitive sensors. Our work has shown that in theory MSA/A_{max} is sufficient to discriminate between safe and unsafe situations. However, if they are to be consistent with the decisions taken by humans, any overtaking assistance device should include a safety margin based on *Ts*.

In conclusion, this study extends the one of Morice et al. (2015) by revealing that drivers are not only sensitive to their car's maximum velocity by also to its maximum acceleration for perceiving overtaking possibility, consistently with the affordance-based framework. From a practical point of view, overtaking assistance devices should include the variable MSA/A_{max} - that uses these underlying actions limits for determining the driver's overtake possibility - to be fully accepted by drivers.

KEY POINTS

- We formalize an overtake-ability affordance based on the minimum acceleration required for safe overtaking
- Drivers take the maximum acceleration and velocity of their vehicle into account in overtaking maneuvers
- The affordance-based framework offers a new perspective for safe overtaking maneuvers

III.3 Prise de décision et régulation de l'action : l'enjeu de l'*affordance MSA/Amax*

III.3.1 Résumé de l'expérimentation 3

Introduction

Les deux études précédentes (Morice *et al*, 2015 ; Basilio, Morice, Marti & Montagne, In press), ont permis de démontrer que les conducteurs réalisaient leurs dépassements en considérant les limites d'action de leur véhicule, qu'elles soient définies en termes de vitesse maximale ou d'accélération maximale. Nous avons ainsi formalisé deux *affordances* de dépassement dimensionnées à l'action : *MSV/Vmax* et *MSA/Amax*. Notre étude précédente (Basilio et al., In press) a également mis en évidence l'utilisation préférentielle de l'*affordance MSA/Amax* par les conducteurs. Toutefois, dans les situations automobiles quotidiennes, le conducteur dispose d'un ensemble d'accélération qu'il peut sélectionner en modifiant les rapports de vitesse de son véhicule. Compte tenu du délai extrêmement court dont dispose un conducteur désireux de doubler pour rétrograder, il serait intéressant de déterminer dans quelle mesure ce dernier perçoit et se recalibre perceptivement aux limites d'accélération relatives à chacun des rapports de vitesse du véhicule conduit.

Dans cette perspective, nous nous proposons de questionner la capacité des conducteurs, lors de la réalisation d'un même dépassement, à exploiter des limites d'action distinctes propres à chaque rapport de vitesse. Il conviendra également de déterminer la capacité des conducteurs à se recalibrer à ces capacités d'action à mesure que leurs limites d'action réelles changent (i.e., accélération maximale en 3^{e} ou en 4^{e}). Pour ce faire, nous permettons aux conducteurs de modifier leurs accélérations à l'aide d'une boîte de vitesse manuelle. En d'autres termes, nous nous interrogeons sur la capacité des conducteurs à sélectionner et à réguler des modes d'action de manière séparée en fonction d'une *affordance* de dépassement définie par des propriétés cinématiques (i.e., accélération) propres à chaque rapport de vitesse.

Méthode

Afin de répondre à l'hypothèse selon laquelle les conducteurs ont la capacité de se recalibrer perceptivement aux limites d'accélération changeantes de leur véhicule, nous avons constitué deux groupes de 12 conducteurs chacun : un groupe avec une 3ème vitesse donnant accès à une accélération maximale faible (A_{max} *3rd Low* = 2.63 m/s²) et un groupe avec une 3ème vitesse donnant accès à une accélération maximale élevée (A_{max} *3rd High* = 3.5 m/s²). La 4ème vitesse était identique pour les deux groupes de conducteurs (A_{max} *4th* = 2 m/s²). Les participants démarraient toujours les essais en 4ème vitesse et devaient estimer à la fois s'il était nécessaire de rétrograder en 3ème vitesse et si cette rétrogradation était suffisante pour réussir l'essai. Dans chacune des conditions expérimentales, la difficulté du dépassement était dépendante des sept valeurs de *MSA* calculées à partir des accélérations maximales des participants en 4ème vitesse. De plus, dans chaque essai, les conducteurs possédaient une vitesse initiale toujours inférieure à la *MSV* initiale. Par ailleurs, les valeurs de *MSA* initiale étaient manipulées afin qu'elles soient inférieures, supérieures ou bien égales à l'accélération initiale du conducteur.

Résultats

Une ANOVA (un facteur : A_{max} *3rd*) pour groupes indépendants est effectuée sur les *PES* (i.e., Point d'Égalisation Subjective) des fréquences de dépassement individuelles, exprimées en fonction du ratio *MSA*/A_{max} *4th*. Elle confirme une plus grande propension au dépassement pour les groupes de conducteurs avec une 3ème vitesse donnant accès à une accélération maximale élevée (A_{max} *3rd High* = 3.5 m/s²). En d'autres termes, les *PES* des groupes de conducteurs avec une 3ème vitesse donnant accès à une accélération maximale élevée sont supérieurs au *PES* du groupe de conducteurs avec une 3ème vitesse donnant accès à une accélération maximale faible. Chaque groupe de conducteurs possède ainsi des fréquences de dépassement différentes pour une même condition de *MSA* initiale.

Toutefois, une ANOVA (un facteur : A_{max} *3rd*) pour groupes indépendants est effectuée sur les *PES* des fréquences de dépassement individuelles, exprimées en fonction du ratio *MSA*/A_{max} *3rd*. Les résultats montrent que nous ne pouvons plus conclure à l'existence d'une différence significative entre les groupes de conducteurs. Par ailleurs, les fréquences de

dépassement deviennent nulles pour les deux groupes de conducteurs lorsque la *MSA* excède leur accélération maximale en 3ème vitesse (A_{max} 3^{rd}).

Enfin, une ANOVA (un facteur : A_{max} 3^{rd}) est effectuée sur les valeurs de *MSA* au moment de la rétrogradation, exprimées en fonction du ratio MSA/A_{max} 3^{rd}. Les résultats révèlent qu'il n'y a pas de différence significative dans les patrons comportementaux des conducteurs lors de l'initiation de la rétrogradation. En d'autres termes, les conducteurs semblent réguler leur accélération de manière identique, en prenant en compte leurs limites d'accélération.

Discussion

Au vu de l'ensemble des résultats, l'expérimentation 3 confirme la capacité des conducteurs à se recalibrer perceptivement aux limites d'accélération changeantes de leur véhicule. Dès lors, ces résultats viennent valider, d'une part, la formalisation mathématique de l' *affordance* (Warren, 1984) et, d'autre part, l'*affordance-based control* développé par Fajen (2007a) selon lequel il est postulé que les individus sont en mesure de sélectionner et de réguler leur mode d'action par la perception d'une information spécifiant une *affordance* dimensionnée à l'action. Par ailleurs, alors que Fajen (2005a, 2005c) avait mis en évidence la capacité des conducteurs à se calibrer à un changement de capacités d'action se produisant entre les essais (inter-essais), nous avons montré que les conducteurs parvenaient également à se calibrer à des changements de limites d'action intervenant au sein d'un même essai (intra-essais), dans des délais temporels extrêmement brefs.

Cette capacité des conducteurs à se recalibrer avec autant de rapidité et de précision à leurs limites d'action confirme également le postulat écologique d'une perception directe des possibilités de dépasser. Ainsi, nous avons mis en évidence la capacité des conducteurs à sélectionner un mode d'action approprié à la situation (i.e., doubler, renoncer ou poursuivre) et à réguler leur accélération de façon à maintenir l'accélération minimale satisfaisante (*MSA*) en deçà des limites d'accélération en 4ème vitesse et en 3ème vitesse. La formalisation d'une *affordance* de dépassement dont les capacités d'action maximales peuvent être modulées par le conducteur (MSA/A_{max} 4^{th} et MSA/A_{max} 3^{rd}) est donc particulièrement pertinente dans ce type de tâche perceptivo-motrice à forte pression temporelle.

III.3.2 Manuscrit de l'expérimentation 3

Driver's ability to use gearbox when performing overtaking maneuvers

Numa BASILIO, Antoine H.P. MORICE and Gilles MONTAGNE

Aix-Marseille Université, CNRS, ISM UMR 7287, 13288, Marseille cedex 09, France

Abstract:

Do drivers be able to select the suited gear for performing safe overtaking maneuvers? We reasoned that the possibilities for overtaking had to be known by perceiving the changes of car's action capabilities induced by the gearbox use. In the present study drivers were instructed on a driving simulator to decide whether the current gear of a virtual car was sufficient enough to perform safe overtaking maneuvers or to shift down one gear if this was deemed providing a sufficient increase of power. Otherwise participants were instructed to follow the lead car. We manipulated the maximum acceleration provided by the 3rd gear between two groups of drivers whereas the maximum acceleration provided by the 4th gear was identical between groups. We also manipulated as between trial variable the minimum satisfying acceleration for safe overtaking (*MSA*). Collision frequency, overtaking frequency and downshifting pattern suggested that drivers took advantage of their gearbox to perform safe overtaking maneuvers. We first showed that overtaking maneuvers were performed at different frequencies between groups of drivers when expressed as a function of $MSA\ /A_{max}\ 4^{th}$ ratio but at similar frequencies when expressed as a function of the $MSA\ /A_{max}\ 3^{rd}$ ratio. Moreover, the *Low-powered* group performed less downshifting actions than the *High-powered* group. Finally, qualitative and quantitative analyses of downshifting frequencies showed that whereas all drivers mainly downshifted before initiating their overtaking maneuver, they downshifted such as adjusting and regulating their acceleration in a way that keep *MSA* below $A_{max}\ 4^{th}$ and $A_{max}\ 3^{rd}$ as found with overtaking maneuvers. Indeed, downshifting frequencies differed between groups when expressed as a function of the $MSA/A_{max}\ 4^{th}$ ratio but became similar once they were standardized by the $MSA/A_{max}\ 3^{rd}$ ratio. These results extend the framework of affordance-based overtaking draw in two previous studies (Basilio, Morice, Marti, & Montagne, 2015; Morice et al., 2015) but remain unsolved whether drivers calibrate themselves simultaneously or perform a rapid recalibration during the unfolding of downshifting actions.

Keywords: Driving, Overtaking, Affordance, Gearbox, Virtual reality

1. Introduction

For safely performing driving maneuvers, any drivers must be able to perceive the fit between its car's specificity and the situation requirement. In addition, everyday life situations also require to being able to cope with sudden changes in these car's specificity. For instance, the monospace used the weekend differs in size from the city car used during business days. As a consequence, being able to cope with the change in the fit between the car's size and a confined place is relevant to park the bigger car in a confined place without colliding with surrounding car's bump. Similarly, those cars also differ in their accelerative capabilities. Therefore, being able to perceive that the maximum acceleration provided by the monospace's engine becomes not sufficient to perform an overtaking maneuver would determine the safety of all the family. Those need to cope with changes in cars specificities may arise over different time scale: over the week (e.g., when renting a car, when trailing an additional load), over a day (e.g., when driving on a wet road weather and on a slippery road when rain falls, ascending or descending a pass) and sometimes over a very brief period (e.g., when shifting down or up a gear). Therefore, the faster cars specificity change, the more compromised the success and the safety of the current maneuver are. This raises the question whether drivers can anticipate such changes by being attuned to different cars specificities or continuously re-calibrate themselves when changes occurred. In the present article we aim at answering to this question by investigating how driver resorted to their gear box in order to increase the maximum acceleration provided by their engine to safely perform overtaking maneuvers.

In the literature, perceiving the fit between environmental opportunity for action and the agent's properties have been widely studied through the concept of affordance (Gibson, 1986). Affordances based on the agent's dimensions (e.g., car length, width) were called *body-scaled affordances* and were historically first investigated. Later, affordances based on kinematics properties of the sport player (e.g., perceving the catchableness of a fly ball with reference to running capabilities : Oudejans, Michaels, Bakker, & Dolné, 1996) or action limits of cars (e.g., perceiving brake-ability with reference to brake strength Fajen, 2005a) were investigated as *action-scaled affordances*. Several experiment thus evidenced the driver's ability to perform accurate perception-motor calibration in order to establish a relation between relevant information in the optic flow and the action capability. In the stopping task, Fajen (2007b) also

evidenced that drivers are capable of rapidly adapt to changes that affect the limits of their car brake strength. Such perceptual-motor re-organization are said recalibration (see Rieser, Pick, Ashmead, & Garing, 1995 for a smart experiment about locomotor recalibration).

A calibration process is also required when overtaking to allow drivers to perceive whether a lead car can be safely overtook given the action limits of the driven car without colliding the oncoming traffic. In two previous studies ran in virtual reality, we indeed outlined that the perceptual-motor processes used by drivers to select and regulate overtaking maneuvers are affordance-based framework. In a first study (Morice, Diaz, Fajen, Basilio, & Montagne, 2015) we evidenced that drivers perceive whether overtaking maneuvers are safe or not by scaling the Minimum Satisfying Velocity (*MSV*) required for safe overtaking with reference to the maximum velocity (V_{max}) of the car they drove. When MSV / $Vmax \leq 1$, it was physically possible to overtake the lead car because the *MSV* was less than or equal to the maximum velocity of the driver's car (*Vmax*) and drivers performed overtaking maneuvers similarly irrespective of their V_{max}. Otherwise overtaking was not safe and drivers decided to follow the lead car. In a second study (Basilio, Morice, Marti, & Montagne, In press) we evidenced that drivers are able to perceive a more fined grained affordance than those defined by the MSV/V_{max} ratio, involving to perceive the Minimum Satisfying Acceleration (*MSA*) with reference to the maximum acceleration (A_{max}) of the driven car. We thus underlined that driver's calibration process involved to be sensitive to the A_{max} of the virtual vehicle in addition to its V_{max} to distinguish between safe and unsafe maneuvers.

In the present study, we aimed at extend this framework of affordance-based overtaking by investigating whether it was relevant to explain the resort of gearbox when overtaking. Indeed, a real-life car requires a more complex calibration that already evidenced since the maximum acceleration provided by the engine depends on the gear used and the current velocity. Therefore, in order to be able to perform an overtaking maneuver deemed impossible with the maximum acceleration provided by the current gear, drivers could shift down a gear in order to get a greater amount of acceleration from their engine. This is illustrated on the Figure 32A, where a simulated driver shift down from the 4th to the 3rd gear to get advantage of an increased maximum acceleration of from 0.37 to 0.46 *g*. As a consequence, whereas the maximum acceleration provided by the 4th gear (A_{max} 4^{th} gear) was insufficient to reach the current minimum satisfying

acceleration (*MSA*) required for a safe overtaking maneuver, the gear downshift allows to increase the current acceleration, to reach the *MSA* and makes the overtaking maneuver possible (Figure 32B). Given the very short time available to downgrade in the unfolding of an overtaking opportunity in traffic, the drivers' ability to quickly recalibrate themselves or switch between action boundaries thus determines their safety.

A **B**

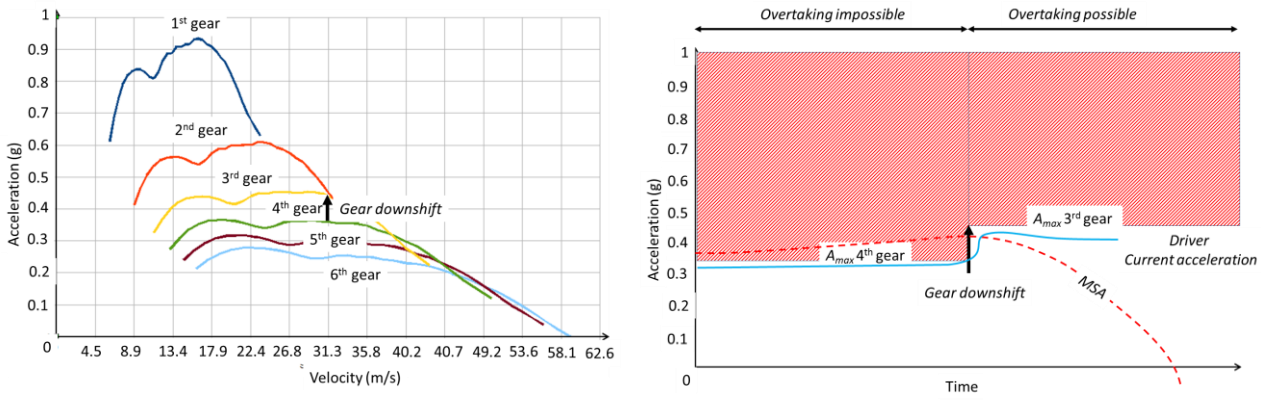


Figure 32 : The amount of acceleration provided by the engine of real-life cars depends on the gear used and the current velocity (Panel A). In average, large acceleration is allowed by the 1st gear and lower acceleration values are provided by upper gears. For a given gear, acceleration varies with speed according to bell-shaped curves. Shifting down a gear allows greater acceleration and can change an impossible overtaking situation possible (Panel B).

The question raised by this present experiment thus concerns the perceptual-motor process that lead drivers to shift down from a gear drivers' to switch between action boundaries and consequently between possibilities for action. In a driving simulator, we manipulated the possibilities to perform overtaking maneuvers from possible to impossible given the maximum acceleration provided by virtual cars. We then instructed two groups of drivers to decide whether their virtual cars allowed a different increase of maximum acceleration when shifting down a gear. Drivers must choose whether shifting down a gear would allow them to perform safe overtaking maneuvers. We predicted that if driver's are simultaneously calibrated with the A_{max} provided by the 4th and 3rd gears, drivers would overtake by downshifting in conditions when

$MSA/A_{max}^{4th} > 1$ and while $MSA/A_{max}^{3rd} < 1$. Drivers would overtake without downshifting when $MSA/A_{max}^{4th} < 1$ and never downshift nor overtake when MSA/A_{max}^{4th} and $MSA/A_{max}^{3rd} > 1$.

2. Method

2.1. Participants

Twenty four experienced drivers (9 women and 15 men), held a valid driving license and had an average of 8 years' driving experience (*SD* = 4.8 years) participated in the experiment. Their average age was 26.5 years (*SD* = 4.8 years) and all had normal or corrected-to-normal vision. The local ethics committee approved the experiment.

2.2. *Task*

Drivers' main task was to perform overtaking maneuver while avoiding collision with lead and a stationary obstacle if deemed possible. They were moreover instructed to decide whether the current gear provided a sufficient power to perform safe overtaking maneuvers or to shift down one gear by pulling the gear stick backwards when this lower gear was deemed providing a sufficient power increase. When neither the current nor the lower gear were deemed providing sufficient power, participants were instructed to follow the lead car. Irrespective of the gear used, they were free to accelerate or brake using appropriate pedals. They controlled the initiation of lateral excursions between lanes to start overtaking or go back on the right lane after overtaking by turning the steering wheel over +/- 30° in the wished maneuver's direction. An acoustic feedback about the driver's car speed was provided by varying the engine sound frequency; the virtual cars were not equipped with speedometers.

2.3. *Apparatus*

The Figure 33 illustrates an overview of the fixed-base driving simulator. Participants sat in a playseat (Mobsim, France) and manipulated two pedals (Trackstar 6000 GTS) with their right

foot in order to accelerate and brake, and used their hands to turn a steering wheel (ECCI, Trackstar 6000 GTS) to control their position in lanes. The virtual car's maximum acceleration could be changed by keeping the gear stick (Lightning SST, Sim-Gear) on the 4th gear or shifting it down to the 3rd gear. The data from the pedals, the gear stick and the steering wheel were sent to a computer, and OpenGL-based software controlled the motion of the virtual car online. From the driver's viewpoint, the virtual scene was rendered as two 800 × 600 pixels stereoscopic images refreshed at 75 Hz in a head-mounted display (Hi-res 900 stereo, Cybermind Corp.). An electromagnetic tracking system (Flock of Birds, Ascension Technology Corp.) was used to tether the virtual scene to driver's head rotations from a fixed observation point (0.975 m above ground level, at the center of the driver's Playseat). The driver could display side and/or center rearview mirrors in the virtual scene by holding dedicated buttons. Mirrors were sized and located realistically relative to the virtual car so as to allow drivers, if deemed comfortable, to fixate the visual content of mirrors while controlling the surrounding driving environment in peripheral vision.

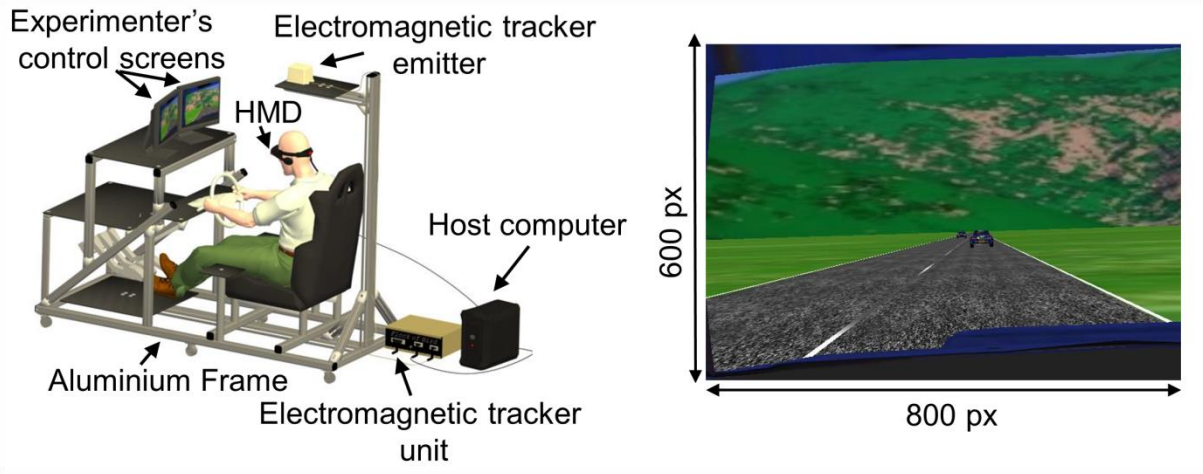


Figure 33. (Left) Overview of the virtual reality set-up. Participants wearing an head-mounted display sat on a playseat. (Right) Typical screenshot of the virtual scene prior to an overtaking maneuver, including two 3.5 m wide lanes, two 4.415 m long × 1.740 m wide × 1.475 m high cars, respectively acting as an obstacle and a lead car, and the landscape. At the trial start, obstacle and lead cars optical diagonal sizes were equal to 0.57 and 1.77°, respectively.

2.4. *Procedure*

Prior to the experiment, drivers completed as many practice trials as deemed necessary to familiarize themselves with the task and calibrate themselves with the maximum acceleration provided by the 4th and 3rd gears. Each trial began with an approach phase during which participants controlled their current speed with a visual gauge, indicating how far they were from the target velocity (V_{ini}). To reach V_{ini} and to begin the trial with a maximal acceleration equal to A_{max} 4^{th} (2 m/s²), the driver had to keep the acceleration pedal at full throttle until the starting. The approach phase ended when drivers succeeded to cross the starting line at V_{ini}. From this point, the visual gauge disappeared and a lead and a stationary obstacle vehicle appeared on the right and left lane, respectively. Drivers were then free to control their acceleration using the pedals and shifting down a gear, and to control their position on lanes with the steering wheel. Otherwise, if the driver didn't succeed to cross the starting line at V_{ini}, the starting line moved 50 meters further away and the approach phase started again. Overtaking situations during practice trials differed from those experienced during the experiment to avoid learning to distinguish between these conditions trials were overtaking were possible from impossible and where downshifting was required from useless. At the beginning of the experimental phase, the experimenter emphasized on the necessity to avoid collisions with surrounding vehicles up to this time. The experiment lasted approximately one hour.

2.5. Independent variables / Design

We manipulated the maximum acceleration allowed by the 3rd gear of the virtual vehicles (A_{max} 3^{rd}) as between group variable. Participants were assigned to either a *Low-powered* (A_{max} 3^{rd} = 2.63 m/s²) or to a *High-powered* (A_{max} 3^{rd} = 3.5 m/s²) virtual cars. These values were respectively based on the maximum acceleration on the third gear of a *Honda Civic SI 2008* and a *Subaru Impreza WRX STI 2008* (Glenn, 2013). The maximum acceleration allowed by the 4th gear (A_{max} 4^{th} = 2 m/s², that corresponded to a *Subaru Impreza WRX STI 2008)* and the maximum velocity (V_{max} = 35 m/s) of virtual cars were constant between groups.

We manipulated the minimum satisfying acceleration (*MSA*) at the start of each trial as between trial variable with seven values ranging from 0.9 to 2.7 m/s² by 0.3 m/s² increments for

the two groups. As in the Basilio et al (In press) study, *MSA* values were obtained by manipulating the initial velocities (V_S, in m/s) of the drivers cars at the trials start from 5 to 16.2 m/s. *MSA* values were selected in order to vary overtaking opportunities identically from 45 to 135% by 15% increments for the two groups given the A_{max} 4^{th}. Oppositely, given the difference between the two groups in the *Amax* 3^{rd} values, MSA/A_{max} 3^{rd} ratio ranged from 34.2 to 102.7% by 11.4% increments from the *Low-powered car* group and from 25.7 to 77.1% by 8.6% increments for the *High-powered car* group. These conditions are summarized in Table 6. These conditions were repeated five times in random order for each participant, resulting in 35 experimental trials. Therefore, *High-powered car* drivers can overtake in 35 trials (100% of trials) by shifting down from the 4th to the 3rd gear while *Low-powered car* would only be able to overtake in 30 trials (85.71% of trials).

Table 6: Overview of experimental conditions. Overtaking possibilities varied according to the ratio between the Minimum Satisfying Acceleration (*MSA*) at the trial start and the A_{max} provided by the gearbox. The A_{max} provided by the 3rd gear was manipulated as between group variable whereas the A_{max} provided by the 4th gear was similar for the *Low-powered car* and *High-powered car* groups.

***Vs* (m/s)**		16.18	14.57	12.96	11.36	9.75	8.14	6.54
***MSA* (m/s²)**		0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7
***MSA* / A_{max} 4^{th} (%)** (A_{max} 4^{th} = 2 m/s² for *Low-powered* and *High-powered cars*)		45%	60%	75%	90%	105%	120%	135%
***MSA* / A_{max} 3^{rd} (%)**	***Low-powered car*** (A_{max} 3^{rd} = 2.63 m/s²)	34.2%	45.6%	57%	68.4%	79.8%	91.3%	102.7%

	High-powered car **(A_{max} 3rd = 3.5 m/s²)**	25.7%	34.3%	42.9%	51.4%	60%	68.6%	77.1%

Note. Shaded cells indicate that overtaking was not possible with the corresponding gear.

2.6. Dependant variables

For each trial, we recorded collisions between the participant's car and either the lead or obstacle cars, identified the maneuver selected by each participant: overtaking, bailing out, and following and determined whether drivers shifted down a gear. Collisions were then categorized depending on the maneuver in progress at the moment of their occurrence (collisions during overtaking, during bailing-out and during following maneuvers; see Basilio et al., In press for details). The collision frequency, overtaking frequency (both successful maneuvers and maneuvers that resulted in collision) and downshifting frequency were calculated for each participant and each condition. A frequency of 100% indicates that the given behavior was performed in each of the five trials for a given condition.

2.7. Statistics

We performed two-way ANOVA (7 *MSA* × 2 A_{max}) on collisions and overtaking frequency and one-way ANOVA (2 A_{max}) on frequency of downshifting actions. For all tests, partial effect sizes were computed (η^2p) and post hoc comparisons were conducted using Tukey's Honestly Significant Difference tests.

4. **Results**

4.1. Frequency of collisions.

Collisions occurred in a large amount of trials (in average 18.57±1.73 and 17.27±1.06% for the *Low-powered car* and *High-powered car* group, respectively). Collisions occurred more often during overtaking (8.46±1.46 and 12.52±1.26% for the *Low-powered car* and *High-powered car* groups, respectively) and bailing-out maneuvers (9.88±0.80 and 4.64±0.86% for *Low-powered car* and *High-powered car* groups, respectively) than during following maneuvers (0.24±0.16 and 0.12±0.12% for *Low-powered car* and *High-powered car* groups, respectively). At a first sight, this large amount of collision is not compatible with the expected attunement of drivers to their virtual car's action capabilities predicted by our affordance framework. However, an absence of driver's calibration to the action limits of their car would involve a higher frequency of collision for *Low-powered car* drivers than *High-powered car* driver. An increase of the frequency of collision with *MSA* values would also occur for both groups in this case, especially for *MSA* conditions making safe overtaking impossible. A two-way ANOVA (7 *MSA* × 2 A_{max}) with repeated measure on *MSA* factor performed on collision frequency ruled out these scenarios by neither revealing a significant main effect of A_{max} 3^{rd} ($p > 0.05$) nor a significant main effect of *MSA* on collision frequency ($p > 0.05$). A significant *MSA* × A_{max} interaction was found (F (6,132) =; $p < 0.05$; $\eta^2 p = 0.27$) but Tukey's Honestly Significant Difference test only showed a significantly marginal higher frequency of collisions of the *High-powered car* drivers than *Low-powered car* group for the 135% MSA/A_{max} 4^{th} ratio condition ($p < 0.05$). Finally, collisions occurring during overtaking maneuvers (★symbols depicted on Figure 33) were most likely to occur when overtaking was possible, suggesting that collisions could be attributed to a lack of control of the driven car rather than to a misperception of the overtaking ability.

4.2. Frequency of overtaking maneuvers.

The solid and dashed curves shown on Figure 33 represent the average overtaking frequency of the *Low-powered car* and *High-powered car* groups plotted as a function of MSA/A_{max} 4^{th} ratio (Panel A) and as a function of the MSA/A_{max} 3^{rd} ratio (Panel B). The panel A

of the Figure 33 shows that overtaking frequency decreases according to MSA/A_{max} 4^{th} for both groups of drivers. There is also a clear gap between the two group's curves occurring from the MSA/A_{max} 4^{th} ratio equal to 75% to the highest ratio. These qualitative observations were confirm by a one way ANOVA (A_{max} 3^{rd}) performed on the Point of Subjective Equality *(PSE)* values computed from the fit of individual overtaking frequency with a logistic regression (cf. Morice et al., 2015). *PSE* values of the *Low-powered car* and *High-powered car* groups were significantly different (2.15±0.05 vs. 2.88±0.05 m/s²; $F(1,22) = 96.89$, $p < 0.05$, $\eta^2p = 0.81$). Conversely, the panel B of the Figure 33 shows that when overtaking frequency are expressed as a function of the ratio between *MSA* and each group own A_{max} 3^{rd} value (i.e., 2.63 and 3.5 m/s², for the *Low-powered car* and *High-powered car* groups, respectively), the two curves overlap. Moreover, overtaking frequency falls to zero when it was impossible to overtake. A one way ANOVA (A_{max} 3^{rd}) performed on the *PSE* values computed from these transformed curves do not showed significant difference between the *Low-powered car* and *High-powered car* groups PSE values (81.75±2.01 vs. 82.29±1.48%; $F(1,22) = 0.05$, $p > 0.05$, *ns*). This suggests that both groups overtake at the same frequency for a given MSA/A_{max} 3^{rd} ratio.

Taken together, these results show that different overtaking frequency were observed between groups were different when *MSA* values were expressed as a function of A_{max} 4^{th} whereas similar overtaking frequency occurred when *MSA* values were expressed as a function of the MSA/A_{max} 3^{rd}.

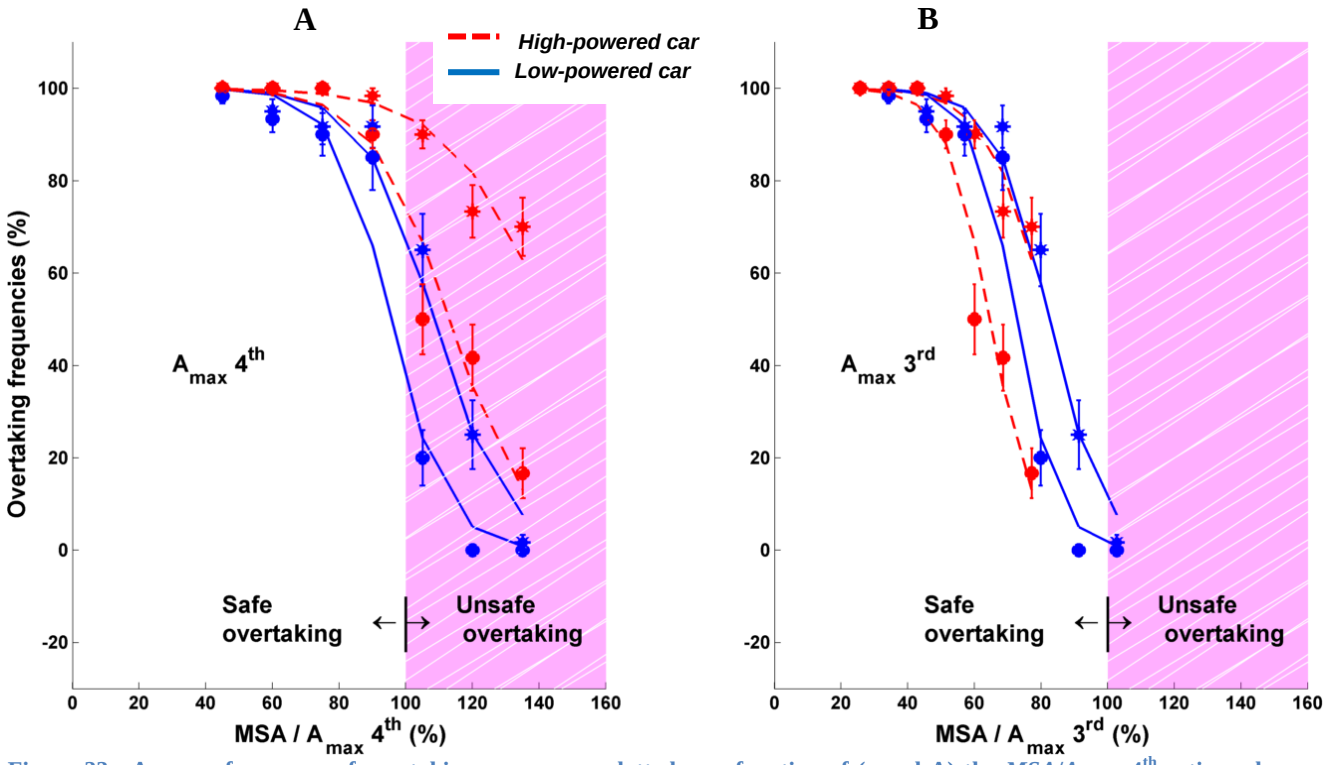


Figure 33 : Average frequency of overtaking maneuvers plotted as a function of (panel A) the *MSA/Amax* 4^{th} ratio and (panel B) as a function of the *MSA/Amax* 3^{rd} ratio for the *Low-powered car* (solid line) and *High-powered car* groups (dotted line). Overtaking maneuvers performed without collisions are depicted with ● symbols whereas overtaking maneuvers give rise to collisions are depicted with ★ symbols. Error bars represent the standard error of individual means.

4.3. Gearbox use along overtaking maneuvers

Analyses were further designed to investigate whether drivers were able resorting to their gearbox during the unfolding of trials. The Figure 34 illustrates changes in driver's kinematics in a typical trial during which a gear was shifted down at a suited time for performing a safe overtaking maneuver. The third panel from top shows that at the trial start, the *MSA* evolves above the A_{max} provided by the 4^{th} gear (MSA/A_{max} 4^{th} equal to 135%). This implies that any overtaking maneuver would be unsafe with the current (i.e., 4^{th}) gear. In parallel, the *MSA* evolves below the A_{max} provided by the 3^{rd} gear (MSA/A_{max} 4^{th} equal to 77.1%) leading overtaking maneuver safe provided any downshift action. During the two first seconds of the trial, the driver accelerates at the maximum value provided by the 4^{th} gear, increasing thus linearly his speed (second panel from top). Since his current acceleration is below the *MSA*, the later increases until 2.4 seconds. At that time, the driver shifted down a gear, and accelerated at the maximum value

provided by the 3rd gear safe overtaking now afforded. This decreased gradually the *MSA* until becoming null at 8 seconds. At this time, the drivers had overtaken the lead car and crossed the obstacle car. This downshifting action was performed before the right-to-left lateral excursion on lane, performed at 3.25 seconds.

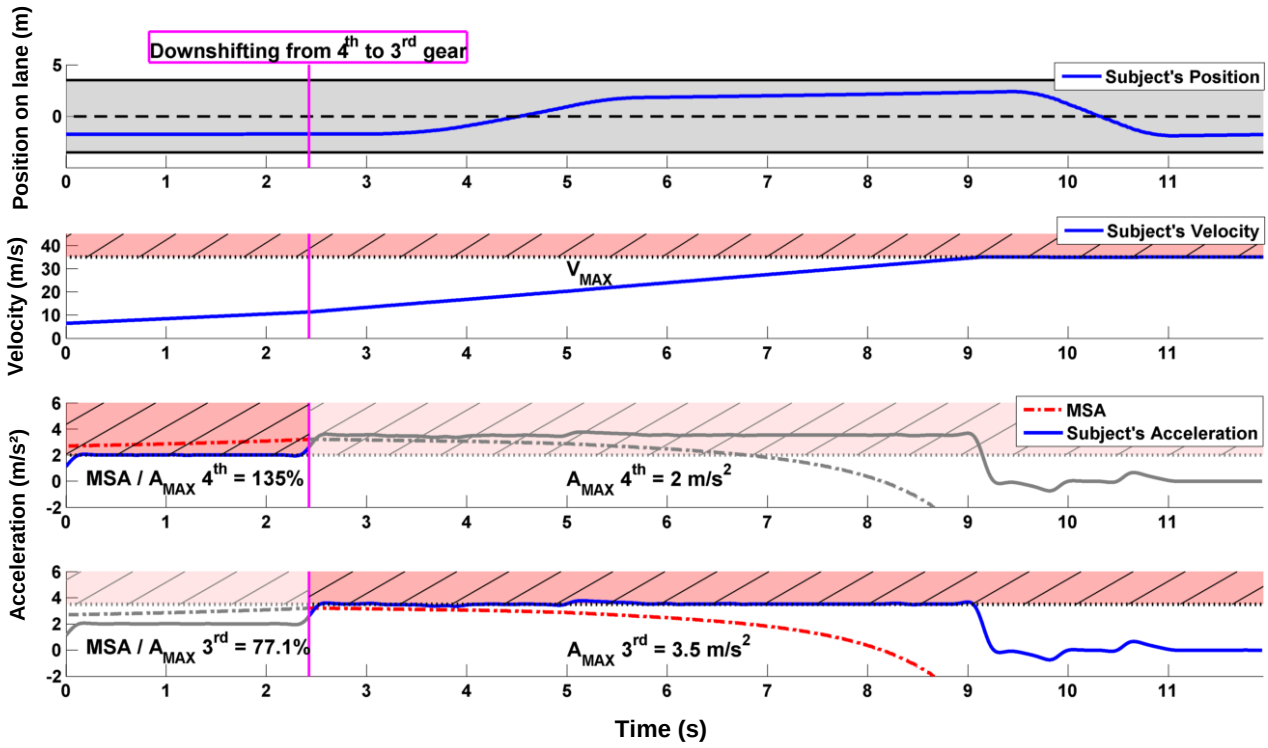


Figure 34: Typical driver's kinematics (Subject 7, Block 1, trial 4, *High-powered car* group) during the time course of an overtaking maneuver (position on lanes, velocity and acceleration from top to bottom panels). *High-powered car* driver shifted down a gear before initiating an overtaking maneuver in a situation where downshifting afforded safe overtaking.

4.4. Downshifting time

The time at which drivers shifted down a gear relative to the initiation of an overtaking maneuver was expected to provide a first insight to the driver's ability to resort to their gearbox for performing safe overtaking maneuvers. Indeed, when a driver shift down a gear before initiating any overtaking maneuver (i.e., downshifting time < 100%), he/she may have perceived that the current gear will not provide a sufficient A_{max} for safe overtaking and is perhaps

anticipated that the lower gear will oppositely provide a sufficient A_{max}. This is true for trials for which the ratio between the *MSA* and the A_{max} provided by the current gear is superior to 100% while the ratio between *MSA* and the A_{max} provided by the lower gear is inferior to 100%. Conversely, when the gear is pushed down in trials for which the ratio between *MSA* and the A_{max} provided by the lower gear is superior to 100% or after initiating an overtaking maneuver (i.e., downshifting time > 100%) he/she waited to be unable to safely complete his/her overtaking maneuver to perceive the insufficiency of the maximum acceleration provided by the current gear. One can thus assume that he/she is probably not able to perceive the *MSA* with reference to the maximum acceleration provided by two gears simultaneously.

The Figure 35 shows that both *Low-powered car* and *High-powered car* drivers mostly downshifted before initiating their overtaking maneuver, around a downshifting time close to 75%. Downshifting actions were nevertheless also performed after the initiation of overtaking maneuvers but vanished gradually with the time spend from the initiation of overtaking. A one-way ANOVA performed on the frequency of downshifting actions performed before the initiation of overtaking maneuvers between *Low-powered car* and *High-powered car* groups revealed no significant main effect of group ($F(1,22) = 0.79$ $p > 0.05$, *ns)*, suggesting that *Low-powered car* and *High-powered car* drivers shifted down a gear at a similar amount of time before the overtaking maneuver (62.51±8.75 vs. 72.13±6.26%, for *Low-powered car* and *High-powered car* groups, respectively). Since both *Low-powered car* and *High-powered car* drivers shifted down a gear before the overtaking maneuver, this results does not rules out the driver's ability to perceive the *MSA* with reference to the maximum acceleration provided by two gears simultaneously.

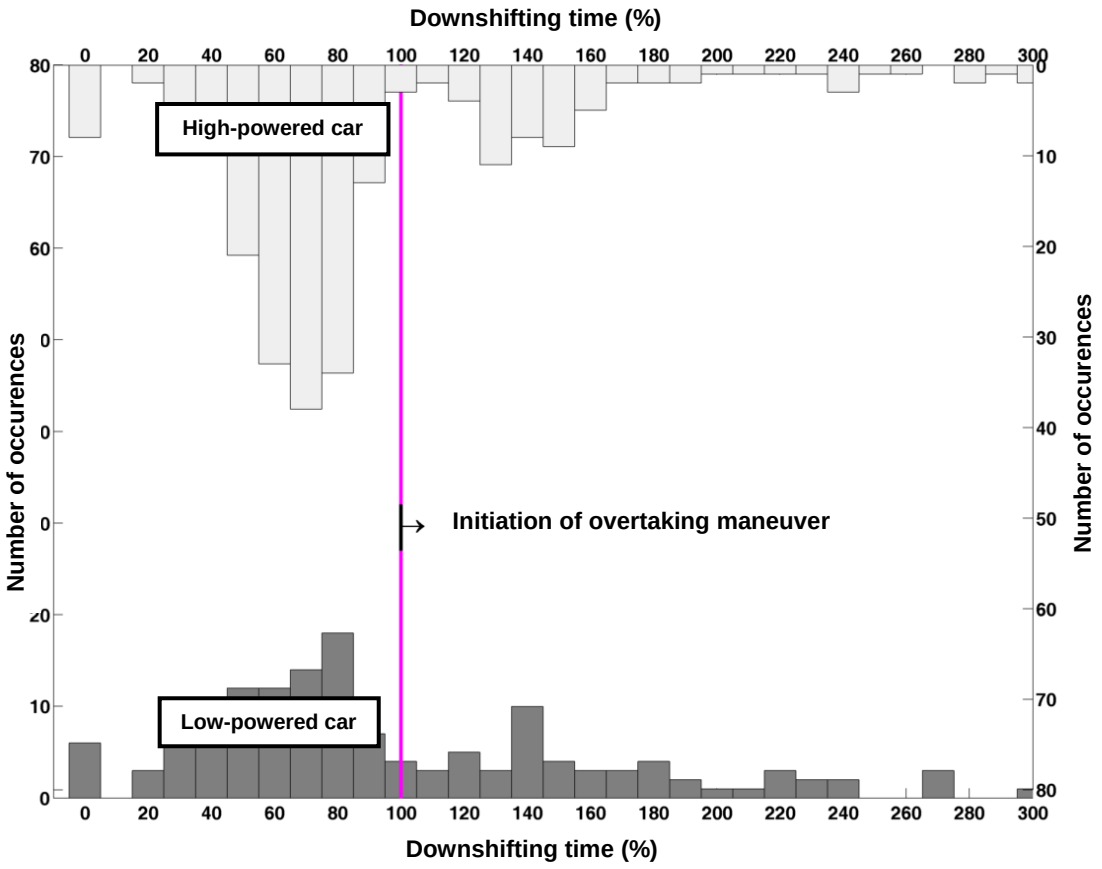


Figure 35: Occurrence of downshifting actions expressed as a function of the time of initiation of overtaking maneuvers for the *Low-powered car* (lower histogram, dark grey) and *High-powered car* (upper histogram, light grey) groups. The vertical line indicates the time at which overtaking maneuvers are initiated (i.e., downshifting time equal to 100%).

4.4.2. Downshifting frequency

The frequency at which *Low-powered car* and *High-powered car* drivers resorted to a downshift of gear would shed more light on the driver's ability to perceive the *MSA* with reference to the maximum acceleration provided by two gears simultaneously. Indeed, the fast group drivers, being exposed to conditions requiring to shift down a gear to safely overtake in 42.85% of trials (i.e., 5 repetition of 3 highest *MSA* conditions over the 5 × 7 *MSA* conditions), was expected to display a higher downshift frequency than the *Low-powered car* group drivers, for which downshifting was required on 28.57% but useless for safe overtaking in 14.28% of trials. A one way ANOVA performed on the frequency of downshifting action showed a significant difference between *Low-powered car* and *High-powered car* ($F(1,22) = 18.07$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.45$), with *High-powered car* drivers performing a larger number of downshift

actions than *Low-powered car* drivers (61.68±3.33% vs. 36.26±6.71%). This leaded possible the drivers' ability to perceive the *MSA* with reference to the maximum acceleration provided by their two own gears simultaneously.

We finally reasoned that the current value of *MSA* at which drivers shifted down a gear relative to the current or to the lower gear would ultimately confirms whether drivers are able to perceive the *MSA* with reference to the maximum acceleration provided by two gears simultaneously. The panel A of Figure 36 suggests that both *Low-powered car* and *High-powered car* groups of drivers shift down a gear at different values of the MSA/A_{max} 4^{th} ratio, with a maximum number of downshifting actions observed at 80 and 120% of the MSA/A_{max} 4^{th} ratio for *Low-powered car* and *High-powered car* groups, respectively. Oppositely, the panel B of Figure 36 shows that both *Low-powered car* and *High-powered car* groups of drivers shift down a gear at similar values of the MSA/A_{max} 3^{rd} ratio (Figure 36, Panel B)[16], with a maximum number of downshifting action observed at 66.16 and 74.29% of the MSA/A_{max} 3^{rd} ratio. These visual observations are supported by statistics. Indeed, separate one-way ANOVAs performed on frequency of downshifting action revealed that *Low-powered car* and *High-powered car* group driver's downshifted at a significant larger frequency than the *Low-powered car* group, for *MSA* values greater than 100% of A_{max} 4^{th} ($F(1,22) = 11.53$, $p < 0.05$, $\eta^2 p = 0.34$). Conversely, *Low-powered car* and *High-powered car* group drivers downshifted at a similar frequency for *MSA* values greater than 100% of A_{max} 3^{th} *Low-powered car* and *High-powered car* ($F(1,22) = 0.10$, $p > 0.05$, *ns).*

[16] We normalized intervals in order to take into account the difference between groups about A_{max} 3^{rd}: intervals of *Low-powered* extended from -200 to 400 in steps of 10%×(A_{max} 4^{th}/ *Slow*), that is 7.6% and for the *High-powered* group intervals extended from -200 to 400 in steps of 10% × (A_{max} 4^{th}/ *Fast*), that is 5.8%.

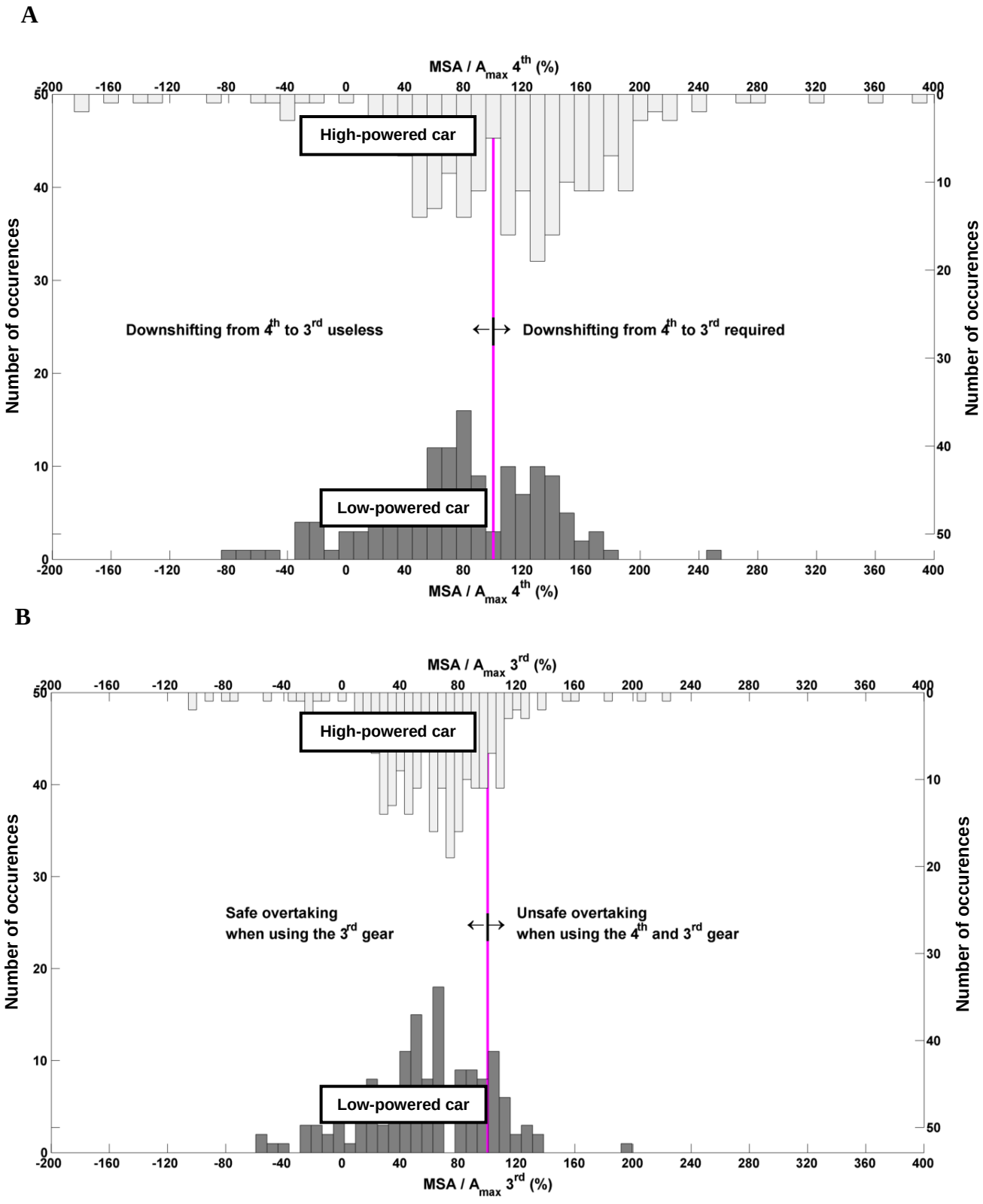


Figure 36: Occurrence of downshifting actions expressed as a function of the ratio between the current Minimum Satisfying Acceleration (*MSA*) and the *Amax* provided by the current gear (panel A) and the lower gear (panel B) for the *Low-powered car* (lower histogram, dark grey) and *High-powered car* (upper histogram, light grey) groups. The

occurrence of downshifting actions are binned along intervals extending from -200 to 400 in steps of 10% × *Amax* 4th/ *Amax* 3rd for the *Low-powered car* (lower histogram, dark grey) and *High-powered car* (upper histogram, light grey) groups. The vertical line depicts the time at which overtaking maneuver are initiated (i.e., downshifting time equal to 100%).

5. Discussion

In the present experiment, we aimed at investigating how drivers resorted to their gearbox to change their action limits depending on overtaking situations. In virtual reality, drivers were instructed to decide whether the current gear provided them a sufficient acceleration to safely overtake a lead vehicle. Otherwise, when a greater acceleration than provided by the current gear was judged necessary, drivers were instructed to decide whether shifting down a gear will provide them the sufficient acceleration or to conversely avoid overtaking and follow the lead vehicle. We manipulated as between trial variable the Minimum Satisfying Acceleration (*MSA*) required for safe overtaking maneuver, so that driver's ability to safely overtake ranged from possible to impossible given the maximum acceleration (A_{max}) provided by the current gear. We also manipulated as between group variable the maximum acceleration provided by the lower gear. Therefore, the drivers of the *High-powered car* were able to safely overtake in all conditions by shifting down a gear (A_{max} increasing from 2 to 3.5 m/s² when downshifting) while the drivers of the *Low-powered car* were only able to safely overtake in 6 conditions among the 7 (A_{max} increasing from 2 to 2.63 m/s² when downshifting). We predicted that drivers calibrated to the maximum acceleration provided by two gears would kept the current gear unchanged and overtake when overtaking was largely below the virtual car limits, shift down a gear and overtake when shifting down a gear was sufficient to safely overtake and follow the lead cars in the other cases.

Despite a large amount of collisions, their pattern of occurrence rules out the possibility that drivers were not attuned to the acceleration limits provided by the virtual gearbox and rather suggests drivers' difficulty with the automatic excursion on lane procedure. Moreover, overtaking frequency revealed that divers could take advantage of the different action limits provided by two gears to safely perform overtaking driving maneuver. Indeed, overtaking frequency of both groups decreased with the increase of *MSA* values as found in our previous studies (Basilio et al.,

In press; Morice et al., 2015). Moreover, between groups significant differences observed when overtaking frequency was expressed as a function of the MSA/A_{max} 4^{th} ratio, vanished when overtaking frequency was expressed as a function of the MSA/A_{max} 3^{rd} ratio. In addition, overtaking behavior in core conditions confirmed that both groups of drivers were attuned to a different value of A_{max} 3^{rd}. First, in the MSA/A_{max} 3^{rd} = 102.7% condition no overtaking maneuvers occurred for the *Low-powered car* group. Second, in the MSA/A_{max} 4^{th} condition equal to 105%, a higher overtaking frequency was observed for *High-powered car* drivers than for *Low-powered car* ones (34.2% vs. 25.7%, respectively). The downshifting patterns also suggested that drivers performed downshift action consistently with an affordance-based process. Indeed, downshift were mainly performed before the initiation of overtaking maneuvers, *Low-powered car* group downshifted with a smaller frequency than the *High-powered car* group (36.26% vs. 61.68%) and between group differences observed in the occurrence of downshift action as a function of the MSA/A_{max} 4^{th} ratio and vanished when expressed as a function of the MSA/A_{max} 3^{rd} ratio. Taken together, our results are consistent with the hypothesis according to which drivers perceive the possibility to overtake according to an affordance process that allow them to take advantage from two action capabilities provided by the gearbox to safely perform overtaking maneuvers.

These results however, do not allow us to conclude whether drivers recalibrated during the unfolding of the trial to two different actions limits or were calibrated to two different acceleration limits as evidenced by Marti, Morice and Montagne (2015).

Conceptualization of *MSA* State:

Equations & Implementation

Ideal Acceleration without V_{max}

Definition

Let a driver moving along an axis (*Oy*). The subject, considered as a point *A*, must arrive at a point *B* at a given time *tB*. We can look for at each instant which acceleration will allow him to get to point *B* at time *tB* if he maintains this constant acceleration. Note the minimum overtaking acceleration at the time *ti*: "*MSA (A) (ti)*." If the point *A* is subjected to this force at the time *ti*, the equation of motion is:

$$pos(A)(t \geq t_i) = pos(A)(t_i) + [t - t_i] \times vit(A)(t_i) + [t - t_i]^2 \times 0.5 \times MSA\ (t_i)$$

At the time *tB*, the position of point *A* coincides (by definition of *MSA*) with that of point *B*, so we have:

$$MSA\ \mathbf{(A)(t_i)} = \mathbf{2 \times (pos(B) - pos(A)(t_i) - [t_B - t_i] \times [vit(A)(t_i))/ t_B - t_i]^2}$$

This equation is true for *ti* <min (*tB*, t_{end}) with the time t_{end} for which the position of the point *A* is equal to *B*. In addition:

(i) if $tB \leq t_{end}$, point *A* cannot reach point B from *tB*. So we can choose to set the *MSA* to infinity by convention from *tB* to t_{end} excluded. Then, from $t = t_{end}$ the *MSA* has no reason to exist (forbidden values)

(ii) if *tB*> $t_{end,}$ point *A* will reach to point *B* before time *tB* (success of the task). The *MSA* is perfectly set up until t_{end} excluded and from t_{end} it has no meaning.

We can note that the velocity of point A induced by *MSA* will increase. Nevertheless, maximum velocity constraints may be present. If necessary, it must conduct a further study.

Ideal Acceleration with V_{max}

Definition

When the minimum overtaking acceleration is in its domain of definition, we must distinguish two cases:

(i) *MSA* without V_{max} induces a velocity of the point *A* that exceeds the V_{max}
(ii) *MSA* without V_{max} induces a velocity of the point *A* that does not exceed the V_{max}.

This study will be restricted from the time when *MSA* is calculated (*ti*) until the moment where the point *A* must be in position of point *B* (*tB*).

At each time *ti*, we have:

$$MSA\ \mathbf{(A)(t_i)} = 2\times(\mathbf{pos(B) - pos(A)(t_i) - [t_B - t_i]\times vit(A)(t_i))/\ [t_B - t_i]^2} \quad \mathbf{(1)}$$

Calculate the velocity induced by this acceleration:

$$vit(A)(t \geq t_i) = vit(A)(t_i) + [t - t_i]\times MSA\ (t_i)$$

We have $vit(A)(t \geq t_i) = V_{max}$ for t_{vmax} satisfying :

$$\mathbf{t_{vmax} = (V_{max} - vit(A)(t_i))/}\ MSA\ \mathbf{(A)(t_i) + t_i}$$

If $\mathbf{t_{vmax} \geq t_B}$, *MSA* acceleration defined in (1) does not induce a velocity of point *A* higher than V_{max} on the time interval $[t_i, t_B]$. Otherwise ($\mathbf{t_{vmax} < t_B}$), we deduce that *MSA* (equation 1) leads to exceeding the maximum velocity, it is necessary to increase this acceleration and determine if it is possible for point *A* to get to point *B* at the time *tB* or if the constraint «V_{max} is too restrictive.

Anyway, from the moment when the *MSA* increases, the time when point A reaches V_{max} decreases, and in all cases, this time will be, a fortiori, lower than *tB*. So we must write the equation of motion of point *A* with a V_{max} in order to deduce the new *MSA*.

For *t* higher or equal to t_{vmax}, the equation of the kinematic is as follows:

$$MSA\ \mathbf{(A)(t_i) = (V^{max} - vit(A)(t_i))^2/(2\times(pos(A)(t_i) - pos(B) + [t_B - t_i]\times V_{max}))}$$

To summarize, we can build *MSA* as follows:

Initialisation:

$MSA_ini(A)(t_i) = 2\times(pos(B) - pos(A)(t_i) - [t_B - t_i]\times vit(A)(t_i))/ [t_B - t_i]^2$ (*MSA* **without** V_{max} **)**

Algorithm:

If $t_{vmax} = (V_{max} - vit(A)(t_i))/ MSA\ (A)(t_i) + t_i \geq t_B$ **(no exceeding of the** V_{max} **)**

$MSA\ (A)(t_i) = MSA_ini(A)(t_i)$

Otherwise **(exceeding of the** V_{max}**)**

$MSA\ (A)(t_i) = (V_{max} - vit(A)(t_i))^2/(2\times(pos(A)(t_i) - pos(B) + [t_B - t_i]\times V_{max}))$

IV. Discussion générale

IV.1 Contributions théoriques

IV.1.1 La théorie des *affordances* appliquée au dépassement automobile

IV.1.1.1 Rappels et apports théoriques des principaux résultats :

L'un des objectifs commun aux trois expérimentations présentées précédemment était d'identifier et de formaliser des propriétés du système agent-environnement ainsi que des propriétés de l'agent à même de rendre compte des stratégies perceptivo-motrices sous-jacentes à la prise de décision et – dans une moindre mesure – à la régulation de l'action lors du dépassement automobile. Jusqu'à présent, aucune étude n'avait démontré la validité des *affordances* dans une telle tâche. Quelques années auparavant, Fajen (2005a, 2005b, 2005c) a mis en évidence à travers des tâches de freinage, la capacité des individus à agir de façon à maintenir un état « idéal » en deçà de leurs limites d'action. Ce comportement implique, de la part des participants, de connaître précisément leurs capacités d'action, définies par des propriétés cinématiques relatives à la décélération maximale, afin de sélectionner et de réguler un mode d'action (e.g., freiner ou ne pas freiner) de manière appropriée eu égard aux contraintes de la situation. De ce fait, Fajen (2005a, 2005b, 2005c) a démontré que la sélection et la régulation du freinage relevaient d'un même mécanisme perceptivo-moteur reposant sur la perception d'une *affordance* dimensionnée à l'action. Qu'en est-il du dépassement automobile ? Les conducteurs prennent-ils la décision de dépasser et régulent-ils leurs comportements en percevant un état minimum à atteindre en référence à leurs capacités d'action ?

Principaux résultats de l'expérimentation 1 :

Afin de répondre au mieux à ces interrogations, il est nécessaire de rechercher *a priori* les propriétés d'intérêt, d'ordre cinématique, pour le conducteur lors de son dépassement. Il est par ailleurs indispensable d'opter pour une formalisation mathématique de l'*affordance* validée par la communauté scientifique (Warren, 1984). En l'occurrence, il s'agissait dans un premier temps de formaliser des possibilités d'action relatives aux propriétés du système agent-environnement.

Dans la première expérimentation, la propriété du système agent-environnement modélisée était la Vitesse Minimale Satisfaisante pour réussir un dépassement (i.e., *MSV*). Dans un second temps, il était nécessaire de déterminer les propriétés de l'agent, i.e., les limites d'action formalisées dans les tâches de dépassement automobile. Dans la première expérimentation, les limites d'action des conducteurs étaient représentées par la Vitesse maximale du véhicule conduit (i.e., *Vmax*). Nous avions donc formalisé une première *affordance* de dépassement dimensionnée à l'action, selon le modèle de Warren (1984), à valider expérimentalement : *MSV/Vmax*. Il s'agissait alors de démontrer que les conducteurs automobiles prenaient la décision de dépasser en fonction de l'*affordance MSV/Vmax*.

Par la mise en évidence d'une différence significative, entre les groupes de conducteurs (*Vmax* élevée et faible), dans les fréquences de dépassement dépendantes des variations de l'*affordance MSV/Vmax*, nous avons pu déterminer la prise en compte des limites d'action du véhicule dans la réalisation du dépassement. La capacité d'un individu à percevoir la frontière entre ce qui est possible et ce qu'il ne l'est plus représente la pierre angulaire de la théorie des *affordances*. Par ailleurs, en exprimant les fréquences de dépassement dans une échelle intrinsèque, c'est-à-dire via un ratio sans dimension *MSV/Vmax*, nous avons montré qu'il n'était pas possible de conclure à une différence significative entres les groupes de conducteurs. Nous avons ainsi mis en exergue un autre aspect essentiel de ce cadre théorique, à savoir le dimensionnement intrinsèque de l'*affordance* aux capacités d'action réelles du conducteur. En d'autres termes, dans un dépassement automobile, les seules unités pertinentes pour les conducteurs sont celles définies par leurs capacités d'action réelles, i.e., la vitesse maximale du véhicule (en m/s). Ce principe permet aux conducteurs de percevoir à chaque instant si la réalisation d'un dépassement automobile est possible ou non.

Apport théorique de l'expérimentation 1 :

Jusqu'à présent, aucune étude ne s'était donnée pour objectif de démontrer la validité de la théorie des *affordances* dans une manœuvre de dépassement automobile. Comme en atteste l'état de l'art dressé dans l'introduction du manuscrit, de nombreuses théories « modulaires » du comportement – i.e., avec une conception séquentialisée de l'action – se sont heurtées à la complexité du dépassement automobile. En outre, à partir de concepts généraux axés sur l'aspect

holiste – i.e., le lien mutuel entre l'agent et l'environnement – et fonctionnel du dialogue perceptivo-moteur édictés par J. J. Gibson (1986) – i.e., l'indissociabilité entre la perception et l'action – nous sommes parvenus à formaliser, a priori, une *affordance* de dépassement dimensionnée à l'action et à valider expérimentalement son utilisation.

Dans la lignée de l'étude de Warren (1984), nous avons pu formaliser cette *affordance* à partir des propriétés du système agent-environnement et des propriétés de l'agent définies en termes d'unités opérantes pour le conducteur. Nous avons ainsi confirmé et élargi le domaine d'application de la théorie des *affordances* en démontrant que dans une manœuvre de dépassement automobile – à l'instar d'une tâche de franchissement de portes, de franchissement d'escaliers, d'interception de balles ou encore de freinage – l'individu sélectionne et régule une action en percevant une *affordance* dimensionnée à l'action, définie par le ratio entre une propriété du système agent-environnement (vitesse minimale satisfaisante, *MSV*) et une capacité d'action maximale (vitesse maximale du véhicule conduit, *Vmax*).

Enfin, parallèlement à ce comportement, nous avons pu observer la capacité du conducteur à percevoir le moment opportun pour initier une manœuvre de renoncement. En d'autres termes, la capacité des conducteurs à percevoir des possibilités de renoncement implique de connaître très précisément les capacités de décélération du véhicule conduit. Dans le cadre de futures recherches, il serait ainsi intéressant de considérer la compétition entre deux *affordances* – dépassement et renoncement – afin de mieux comprendre les stratégies perceptivo-motrices sous-jacentes à la prise de décision et à la régulation du dépassement automobile (Marti et al., 2015) .

Principaux résultats de l'expérimentation 2 :

Dans la deuxième expérimentation, la propriété du système agent-environnement modélisée était l'Accélération Minimale Satisfaisante (*MSA*). Deux propriétés de l'agent, i.e., des limites d'action, ont également été prises en compte : la Vitesse maximale (*Vmax*) et l'Accélération maximale du véhicule conduit (*Amax*). Nous avions donc formalisé une nouvelle *affordance* de dépassement – dimensionnée à l'action – à valider expérimentalement : *MSA/Amax*. Il s'agissait également de démontrer l'utilisation préférentielle de cette dernière vis-à-vis de l'*affordance MSV/Vmax*. La mise en évidence de différences dans les fréquences de

dépassement, entre les groupes de conducteurs, en fonction des variations de l'*affordance MSA/Amax* et non plus seulement de l'*affordance MSV/Vmax* a confirmé notre hypothèse initiale selon laquelle le ratio *MSA*/*Amax* représentait une nouvelle *affordance* de dépassement perçue préférentiellement par les conducteurs durant leur dépassement. Par ailleurs, en exprimant les fréquences de dépassement dans une échelle intrinsèque, c'est-à-dire en fonction du ratio sans dimension *MSA/Amax*, nous avons montré qu'il n'était pas possible de conclure à une différence significative entres les groupes de conducteurs (*Amax* élevée vs. faible). Nous avons ainsi démontré que les conducteurs se calibrent perceptivement à une *affordance* de dépassement dont les propriétés sont définies en unité d'accélération (e.g., *MSA* et *Amax*). La nouvelle *affordance MSA/Amax* s'est donc avérée pertinente et fonctionnelle pour renseigner les conducteurs sur la faisabilité d'un dépassement et de ce fait rendre compte de leurs comportements de prise de décision et – dans une moindre mesure – de régulation de l'action.

Apport théorique de l'expérimentation 2 :

À travers cette nouvelle étude, nous avons pu confronter la théorie des *affordances* à une nouvelle situation de dépassement dans laquelle l'accélération du véhicule conduit est également considérée. Le premier des apports théoriques réside dans la formalisation d'une nouvelle *affordance* de dépassement formalisée à partir de propriétés définies dans une unité d'accélération. Dans la lignée de l'étude précédente, la sélection et la formalisation des propriétés du système agent-environnement et des propriétés du conducteur se sont appuyées sur des unités fonctionnelles définies, cette fois-ci, en termes d'accélération. Nous avons ainsi élargi la gamme des unités fonctionnellement pertinentes pour le conducteur.

En outre, dans un souci de réalisme, la formalisation d'une seconde *affordance* de dépassement représente une véritable innovation théorique puisque deux *affordances* de dépassement formalisées à partir de propriétés définies dans des unités distinctes sont potentiellement utilisables par le conducteur désireux de doubler. La formalisation d'une *affordance* de dépassement relative à la vitesse maximale du véhicule conduit et d'une seconde *affordance* relative à l'accélération maximale du véhicule conduit a donc permis de confirmer la perception et l'utilisation préférentielle de l'une d'entre elles par le conducteur. L'intérêt théorique d'une telle formalisation a été d'une part de démontrer la pertinence de l'*affordance*

MSA/Amax dans la sélection et la régulation du dépassement. D'autre part, cela a permis de mettre en évidence la perception préférentielle de l'*affordance MSA*/*Amax* par rapport à l'*affordance MSV*/*Vmax.*

En effet, dans notre expérimentation, l'atteinte de la *MSV* avant qu'elle n'excède *Vmax* était une condition nécessaire pour réussir un dépassement automobile tandis que l'atteinte de *MSA* avant qu'elle n'atteigne l'*Amax* était une condition suffisante (cf. expérimentation 2). Ce résultat novateur confirme ainsi la capacité du conducteur à percevoir, parmi un ensemble de propriétés, celle qui sera pertinente pour la réussite de son action parce que traduisant ses possibilités d'action réelles. Ce comportement pourrait s'expliquer par un principe de sécurité (de Rugy et al., 2001) puisque la priorité est accordée à l'*affordance MSA/Amax* qui renseigne à la fois plus précisément et plus précocement le conducteur sur la faisabilité du dépassement. Par ailleurs, les fortes contraintes spatio-temporelles associées au dépassement automobile auraient induit une recalibration perceptive du conducteur vers une information de haut niveau (i.e., *affordance MSA*/*Amax*) plus à même de spécifier précisément l'état du système agent-environnement (Jacobs, Michaels, & Runeson, 2000; Michaels & de Vries, 1998). À l'inverse, la perception du conducteur serait orientée vers une information de bas niveau *MSV*/*Vmax,* dont la corrélation avec les possibilités de dépasser croitraient à mesure que les contraintes spatio-temporelles et la nécessité d'accélérer décroitraient.

Toutefois, si la césure était aussi franche dans le comportement perceptivo-moteur des conducteurs, nous aurions dû observer des comportements de dépassements identiques pour un même ratio *MSA*/*Amax* entre les groupes de conducteurs, indépendamment des ratios de *MSV*/*Vmax*. Or, la sensibilité inattendue des conducteurs au temps requis pour que leur vitesse courante atteigne *MSV* à partir de leur vitesse initiale (*Ts*), traduite par son poids dans la régression du comportement de dépassement, a mis en évidence de plus grandes fréquences de dépassements pour le groupe de conducteurs possédant une accélération maximale élevée comparativement au groupe doté d'une accélération faible, et ce malgré un même ratio *MSA/Amax*.

Dans le cadre théorique de l'*affordance-based control* (Fajen, 2007a), une infinité de comportements et de chances de réussite sont possibles tant que l'état idéal est maintenu dans une région de confort bornée par les limites d'action du sujet. Toutefois, dans notre expérimentation, comme *MSV*, i.e., un des deux états idéaux, évolue à proximité de la limite d'action du

conducteur (*Vmax*), le nombre de comportements possibles décroit à mesure que les contraintes temporelles augmentent. Ainsi, lorsque la vitesse courante du conducteur est proche de la *MSV* (Morice et al. 2015), de grandes accélérations ne sont pas nécessaires, *MSV*/*Vmax* covarie avec le nombre de comportements possibles et informe précisément le conducteur sur ses possibilités de dépasser. Cependant, dans notre expérimentation, les écarts entre vitesse courante et *MSV* sont conséquents et nécessitent de plus grandes accélérations que celles présentes dans l'étude de Morice et al. (2015). Les conducteurs se seraient donc basés sur une propriété de bas niveau (*Ts*) qui permet d'estimer les contraintes temporelles du dépassement. En d'autres termes, la propriété temporelle *Ts* renseignerait le conducteur sur la marge de sécurité dont il dispose pour rejoindre *MSA* dans des conditions où le degré de liberté du conducteur est très faible, c'est-à-dire où les contraintes temporelles sont sévères.

La stratégie perceptivo-motrice qui consiste à s'appuyer sur des propriétés de haut niveau et de bas niveau pourrait être une étape intermédiaire de l'apprentissage perceptif du conducteur. À terme, on peut imaginer que la perception du conducteur ne s'appuie plus que sur des propriétés de haut niveau (Bastin et al., 2010; Fajen, 2007b; Flach, 2011; McKenna, 2004). À l'instar de Fajen (2007b) ou encore de Bastin et al. (2010), nous pourrions envisager de futures expérimentations dans lesquelles nous introduirions des modifications des capacités d'action sans que les conducteurs en aient conscience. Une telle manipulation des capacités d'action permettrait de mettre en évidence le degré de calibration perceptive du conducteur.

Principaux résultats de l'expérimentation 3 :

Dans la troisième expérimentation, la propriété du système agent-environnement modélisée était l'Accélération Minimale Satisfaisante (*MSA*). Les propriétés de l'agent, i.e., limites d'action du conducteur, étaient dépendantes des accélérations disponibles en 4ème et 3ème vitesse (respectivement, A_{max} 4^{th} et A_{max} 3^{rd}). Les conducteurs pouvaient alors modifier leurs limites d'accélération maximales à l'aide d'une boîte de vitesse manuelle. Nous avons donc formalisé une *affordance* de dépassement qui intégrait la modulation des limites d'accélération maximales : MSA/A_{max} 4^{th} et MSA/A_{max} 3^{rd}. L'objectif de l'expérimentation 3 consistait à

déterminer si les conducteurs étaient toujours en mesure d'agir de façon à maintenir une accélération minimale satisfaisante en deçà d'une limite d'accélération lorsque cette dernière changeait au cours de l'essai. Nous avons ainsi questionné la capacité des conducteurs, lors de la réalisation d'un même dépassement, à exploiter des limites d'action distinctes propres à chaque rapport de vitesse. Les résultats obtenus ont montré des différences comportementales lorsque les conducteurs rétrogradaient en 3ème vitesse (A_{max} 3^{rd}) contrairement aux comportements de dépassement observés en 4ème vitesse (A_{max} 4^{th}). Ces résultats démontrent que les conducteurs sont en mesure de prendre en compte plusieurs limites d'accélération dans un délai temporel très court (intra-essais) et enrichissent, de ce fait, les précédentes études (Bastin et al., 2010; Fajen, 2005a, 2005c).

Par ailleurs, dès lors que les fréquences de dépassement entre les différents groupes de conducteurs (A_{max} 3^{rd} *High* vs A_{max} 3^{rd} *Low*) sont exprimées en fonction d'une échelle de mesure intrinsèque, i.e., *MSA*/A_{max} 3^{rd}, nous ne pouvons plus conclure à l'existence de différences significatives entre les groupes. Ce résultat reflète la capacité des conducteurs à sélectionner leur dépassement en percevant la relation entre les propriétés du système agent-environnement (*MSA*) et les propriétés de l'agent, i.e., leurs limites d'accélération réelles (A_{max} 4^{th} et A_{max} 3^{rd}). Enfin, un dernier résultat vient étayer l'*affordance-based control* de Fajen (2007a) en mettant en évidence une régulation du dépassement visant à maintenir la *MSA* en deçà des limites d'action de la 3ème vitesse. Les valeurs de *MSA* au moment de la rétrogradation, exprimées en fonction du ratio *MSA*/ A_{max} 3^{rd}, sont identiques entre les groupes de conducteurs malgré une 3ème vitesse différente. En d'autres termes, les conducteurs régulent leur accélération courante en prenant en compte les limites d'accélération du véhicule conduit.

Dans la lignée des travaux de Fajen (2005a, 2005c, 2007a) relatifs aux tâches de freinage et au contrôle de l'action et en utilisant la formalisation mathématique de Warren (1984), nous avons validé et enrichi les principes théoriques de l'*affordance* en déterminant les mécanismes perceptivo-moteurs sous-jacents à la sélection et à la régulation d'un dépassement automobile à travers la perception d'*affordances* dimensionnées à l'action.

Apport théorique de l'expérimentation 3 :

Alors que les précédentes expérimentations avaient essentiellement trait à la sélection d'un mode d'action (dépasser ou ne pas dépasser) à partir de la perception d'une *affordance* de dépassement dimensionnée à l'action, nous nous sommes ici focalisés à la fois sur la sélection et la régulation d'un mode d'action en questionnant la capacité des conducteurs, lors de la réalisation d'un même dépassement, à exploiter des limites d'action distinctes propres à chaque rapport de vitesse. Cet aspect du comportement est essentiel d'un point de vue théorique car il vient confirmer et élargir la validité de la réévaluation de l'*affordance* faite par Fajen (2007a, 2013) à travers l'*affordance-based control*. Par ailleurs, nous avons également validé la pertinence de la formalisation mathématique de l'*affordance* établie par Warren (1984). Jusqu'à présent, aucune étude n'avait confronté la capacité de l'*affordance* à rendre compte de la sélection et de la régulation d'un mode d'action dans une tâche aussi complexe que le dépassement automobile.

Un deuxième apport théorique de l'expérimentation 3 réside dans la formalisation d'une nouvelle *affordance* de dépassement à partir de propriétés définies en termes d'accélération et relatives aux rapports de vitesse en 4ème et en 3ème vitesse du véhicule conduit. Dans un souci de réalisme, afin d'étudier la capacité de sélection et de régulation des conducteurs à partir d'une *affordance*, nous avons rendu possible l'utilisation d'une boîte de vitesse durant le dépassement. Les conducteurs ayant eu comme consigne de changer de vitesse uniquement s'ils percevaient qu'il était nécessaire de le faire pour réussir le dépassement, nous avons pu mesurer en temps réel leur sensibilité face à l'évolution d'une accélération minimale satisfaisante par rapport à leur limite d'accélération actuelle. Conformément à notre hypothèse, durant un dépassement automobile, la perception d'une *affordance* dimensionnée à l'action permet aux conducteurs de sélectionner et de contrôler un mode d'action en considérant leurs limites d'action maximales (Fajen, 2007a).

Dans le prolongement de ce résultat, le dernier apport théorique de notre étude réside dans l'échelle de temps à laquelle est intervenue la modification des limites d'action du conducteur. Contrairement aux études de Fajen (2005a, 2005c) dans lesquelles l'auteur mesurait la capacité des conducteurs à se recalibrer à une modification de leur décélération maximale intervenant entre chaque blocs d'essais, nous avons mesuré la capacité des conducteurs à se recalibrer à des

changements d'accélération maximales intervenant au sein d'un même essai (intra-essai). Compte tenu du délai extrêmement court dont disposaient les conducteurs (2 à 3 sec) pour percevoir de nouveaux états idéaux et de nouvelles limites d'accélération, la réussite du dépassement est une nouvelle confirmation de la remarquable efficacité des mécanismes perceptivo-moteurs sous-jacents à la perception d'une *affordance* de dépassement. Ce résultat démontre ainsi la capacité de l'*affordance* à renseigner les conducteurs sur les possibilités de dépassement sans qu'un long délai temporel soit nécessaire. Dès lors, conformément à la théorie des *affordances* (J. J. Gibson, 1986), les possibilités de dépasser semblent être perçues directement par le conducteur.

.

CONCLUSION :

Au fil des expérimentations, nous avons essayé de nous rapprocher au plus près de la complexité perceptive et motrice de la tâche de dépassement rencontrée par les conducteurs au quotidien. À travers les trois expérimentations réalisées sur simulateur de conduite, nous avons ainsi pu identifier les propriétés du système agent-environnement ainsi que les propriétés de l'agent et formaliser l'utilisation de nouvelles *affordances* dimensionnées à l'action, impliquées dans la prise de décision et la régulation d'un dépassement automobile. Aucune étude ne s'était encore intéressée à la formalisation de telles *affordances* de dépassement. Ce travail de recherche représente donc une étape supplémentaire dans la compréhension des comportements individuels et valide le fait que les individus sélectionnent et contrôlent un mode d'action en considérant leurs limites d'action maximales. En d'autres termes, nous avons élargi le domaine d'application de la théorie des *affordances* (J. J. Gibson, 1986; Warren, 1984), en validant ses principes et sa formalisation mathématique dans une tâche de dépassement automobile. Par ailleurs, nos travaux accréditent les propositions de Fajen (2007a) – relatives à l'*affordance-based control* – en démontrant la capacité des conducteurs à sélectionner et à réguler leur mode d'action à travers la perception d'une *affordance* dimensionnée à l'action.

Enfin, au cours de ces expérimentations nous avons mis en évidence la coexistence d'*affordances* multiples du dépassement, de bas et de haut niveau (e.g., *MSV*/*Vmax* et *MSA*/*Amax*, respectivement), afin de comprendre au mieux les processus de prise de décision et de régulation de l'action. Par ailleurs, il semble également indispensable de considérer la prise en

compte d'*affordances* multiples permettant d'opter pour des modes d'action distincts lors de la réalisation d'un dépassement. En effet, il est difficilement envisageable qu'un conducteur désireux de dépasser prenne uniquement en compte les capacités de décélération ou d'accélération de son véhicule. La compréhension des stratégies perceptivo-motrices sous-jacentes au dépassement automobile devra ainsi nécessairement inclure la compétition entre *affordances* de dépassement et de renoncement (Marti et al., 2015).

IV.1.1.2 Un regard théorique probabiliste du dépassement automobile

L'analyse de la tâche de dépassement nous a permis de mettre en évidence l'indispensable considération du cycle perception-action dans l'étude de la sélection et de la régulation de l'action. Tout au long de ce manuscrit, nous avons fait l'hypothèse que le conducteur, pour agir dans son environnement routier, perçoit des *affordances* de dépassement qui orientent ses actions en retour (Figure 6). Dans les différentes expérimentations, les mécanismes perceptivo-moteurs ont été formalisés à travers le ratio entre les propriétés du système agent-environnement et les propriétés de l'agent (Warren, 1984), permettant par ailleurs de valider notre hypothèse initiale. Toutefois, il est important de discuter à présent des interprétations comportementales relatives au dépassement automobile selon d'autres approches théoriques.

Nous aborderons dans le cadre de cette partie, une approche théorique très récente dans le domaine des sciences cognitives, au champ d'application relativement large : la théorie bayésienne de la décision. Le cadre théorique bayésien (i.e., d'inférence bayésienne) considère que notre cerveau est doté de mécanismes évolués de raisonnement probabiliste (Dehaene, 2012). En écho à ce que nous avons énoncé précédemment, la théorie bayésienne peut être apparentée à une théorie dite de la minimisation de l'énergie libre (Friston, 2010). Une des premières études à avoir utilisé le cadre théorique bayésien pour modéliser la complexité des comportements de dépassement automobile a été menée par Vlahogianni (2013). Dans cette expérimentation, les réseaux bayésiens sont utilisés pour identifier et modéliser les propriétés pouvant influencer la durée d'un dépassement réalisé par de jeunes conducteurs et conductrices sur des routes

nationales à deux voies de circulation. Ils permettent également de mettre en évidence l'influence que peuvent avoir les caractéristiques microscopiques du trafic (espacement des véhicules, vitesses du véhicule à doubler et du véhicule venant en sens inverse, etc.) sur la décision de doubler. Les données sont collectées en utilisant un simulateur de conduite. Différents modèles sont développés pour décrire la durée totale de dépassement, ainsi que les durées des phases d'accélération et de rabattement (Figure 37).

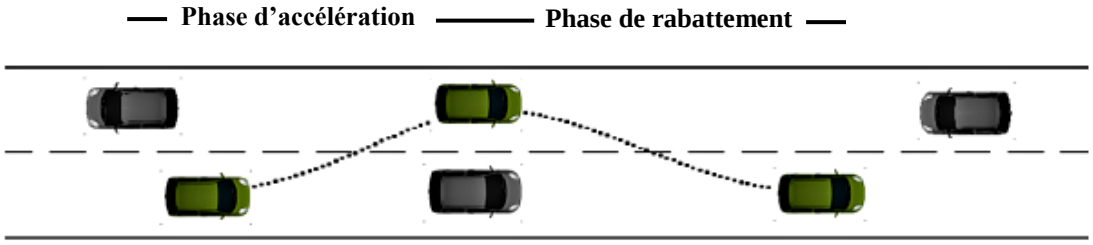


Figure 37 : Représentation graphique des deux phases du dépassement : phase d'accélération et phase de rabattement. Schéma tiré de Vlahogianni (2013)

Les résultats montrent que la durée de chaque phase de dépassement, ainsi que la durée totale du dépassement, sont idéalement décrites par une distribution log-logistique (Pollatschek & Polus, 2005). Les résultats indiquent que, hormis la phase d'accélération (Figure 37), le genre est une propriété critique pour la durée de modélisation du dépassement automobile (Cantin et al., 2009; Llorca et al., 2013; Mohaymany et al., 2010a; Özkan & Lajunen, 2006) contrairement à ce qu'avait montré Farah (2013). D'autres propriétés ont également une incidence sur le comportement ; c'est le cas de la différence de vitesse avec le véhicule à doubler, de la vitesse du véhicule venant en sens inverse, de l'espace entre le véhicule à doubler et le véhicule en sens inverse (Buřič & Janovský, 2007, 2009, 2013; Toledo & Farah, 2011), ainsi que de l'engagement du conducteur dans plusieurs dépassements.

Cette étude fait également écho aux travaux de Vlahogianni et Golias (2012) dont les résultats indiquent que les conducteurs, en moyenne, acceptent de plus petits espaces dans leur dépassement que les conductrices (Farah et al., 2009). Par ailleurs, un regard approfondi sur les relations entre les caractéristiques microscopiques du trafic et la probabilité de doubler révèle des différences entre les conducteurs et les conductrices. Ces dernières ont eu plus de difficultés à évaluer la circulation routière afin de juger de l'opportunité d'un dépassement. Vlahogianni et

Golias (2012) expliquent que ces comportements sont probablement dus aux différences pouvant exister entre les conducteurs et les conductrices (Cantin et al., 2009) dans le processus de balayage visuel et d'appréciation de l'environnement routier pour décider d'initier un dépassement.

Les limites de la théorie bayésienne

Compte tenu des résultats obtenus, il apparaît très intéressant de modéliser et de décrire la prise de décision des conducteurs à partir de la théorie bayésienne. En adoptant cette approche probabiliste, Vlahogianni *et al.* ont pu analyser le poids que chaque propriété extrinsèque ou intrinsèque pouvait avoir sur la probabilité de dépasser. Toutefois, la théorie bayésienne semble présenter certaines limites pour étudier le comportement des conducteurs ancrés dans leur environnement. Tout d'abord, les études de Vlahogianni *et al*. se contentent uniquement de décrire un comportement à partir de multiples propriétés pour ensuite déterminer celles qui auraient le plus de poids sur la prise de décision des conducteurs. À aucun moment les auteurs ne fournissent d'hypothèses comportementales sur l'utilisation préférentielle d'une propriété par rapport à une autre. Nous sommes ici dans un registre purement analytique du comportement automobile, à l'instar de Mohaymany *et al*. (2010a).

Par ailleurs, comme le démontrent les auteurs, l'étude modulaire des propriétés d'intérêt du conducteur peut avoir une influence causale sur le délai de prise de décision sans forcément être l'objet de la perception à l'échelle de l'agent engagé dans la tâche, compte tenu du temps de traitement que ces propriétés nécessiteraient. De plus, bien qu'intégrant les vitesses propres à chaque véhicule, les auteurs omettent de prendre en compte les limites d'action des véhicules conduits (e.g., vitesse ou accélération maximale). Aucune précision n'est d'ailleurs apportée sur la possibilité donnée aux conducteurs d'utiliser leur boîte de vitesse durant le dépassement. Les propriétés intégrées dans le modèle probabiliste auraient sans doute eu une influence moindre sur la probabilité de dépasser si le conducteur avait pu modifier les capacités d'accélération réelles de son véhicule en fonction des contraintes spatio-temporelles rencontrées.

De manière intuitive, « connaître » les capacités d'action réelles de son véhicule semble revêtir une importance fondamentale dans la sélection et la régulation d'un mode d'action,

comme en attestent les nombreuses études sur le sujet (Fajen, 2005a, 2005c, 2007b; Fajen & Devaney, 2006). Pour reprendre les termes propres à la théorie bayésienne, la probabilité d'initier un dépassement est probablement plus grande au volant d'une voiture sportive qu'à celui d'une voiture de loisir et ceci quel que soit l'espace inter-véhiculaire séparant le véhicule sujet et le véhicule à doubler. En effet, plutôt que de percevoir un certain espacement avec le véhicule que l'on désire doubler, ce qui importe est avant tout de percevoir si la capacité d'accélération de notre véhicule sera suffisante pour réussir le dépassement sans encombre. En quelque sorte, il s'agit ici de percevoir la mise à échelle des propriétés du système agent-environnement aux capacités d'action réelles du conducteur. De ce fait, les capacités d'action réelles des véhicules n'étant pas identiques, cette différence de limites d'action influencera directement le délai de prise de décision (Fajen, 2005a, 2005c, 2007b; Fajen & Devaney, 2006). Il aurait été en ce sens particulièrement intéressant de modéliser les limites d'action propres à chaque véhicule afin de mesurer leur influence au sein du modèle probabiliste bayésien. Le poids de la propriété de l'agent « limites d'action du véhicule » aurait probablement été très fort dans la prise de décision des conducteurs et aurait permis de discuter le concept d'*affordance*.

Ainsi, au vu de la méthodologie et du cadre théorique utilisés par Vlahogianni et Golias (2012) et Vlahogianni (2013) dans la modélisation du dépassement automobile, nous devons nous interroger sur la capacité du modèle probabiliste bayésien à rendre compte de la sélection et de la régulation de l'action du conducteur.

Il s'agit à présent de discuter les limites du caractère prospectif de l'*affordance*, i.e., de sa régulation de l'action au cours du temps sans anticipation préalable, formalisée à partir de propriétés définies en unité d'accélération (*MSA/Amax*). Par ailleurs, de futures recherches permettant de caractériser plus précisément les mécanismes perceptivo-moteurs du dépassement automobile par l'identification des invariants optiques devront être engagées.

IV.1.2 Formalisation d'une *affordance* dimensionnée à l'action : limites et perspectives

La volonté affichée au cours de ce travail doctoral de se rapprocher d'un comportement de dépassement automobile écologique reste l'enjeu principal de futures recherches. Malgré l'utilisation d'un simulateur de conduite associé à la réalité virtuelle, les résultats obtenus ne sont applicables que dans le cas d'un obstacle fixe présent sur la voie opposée. Qu'en serait-il si ce véhicule obstacle venait à circuler avec des variations de vitesse ou d'accélération par exemple ?

IV.1.2.1.1 *Affordance et réalisme du dépassement automobile : quelles limites ?*

Dans ce document, chaque expérience présentée était constituée d'une configuration spatiale de véhicules simplifiée. Nous avons délibérément choisi de maintenir immobile le véhicule obstacle (i.e., positionné dans la voie opposée de circulation) afin de déterminer avec précision si les collisions produites au cours du dépassement automobile étaient bien le fait d'une mauvaise perception des possibilités d'action du conducteur et donc de l'*affordance* de dépassement (Morice et al., 2015). Nous avons dès lors écarté l'influence possible d'une mauvaise perception du véhicule obstacle circulant en sens inverse. De futures recherches sur l'analyse du comportement du conducteur et la formalisation d'*affordances* du dépassement devront nécessairement tendre vers une situation plus écologique dans laquelle l'ensemble des véhicules serait en circulation. Il ne fait aucun doute que la propriété du système agent-environnement, d'ordre cinématique, modélisée dans les deux dernières expérimentations – i.e., l'Accélération Minimale Satisfaisante (*MSA*) – ne serait plus aussi pertinente pour caractériser les contraintes spatio-temporelles du dépassement. La complexité inhérente à une telle situation de dépassement automobile devra donc être modélisée et intégrée dans une nouvelle formalisation de la *MSA*.

Il apparaît dès lors pertinent de nous questionner sur la capacité des conducteurs à percevoir des possibilités d'action émergeant d'une relation systémique complexe entre le conducteur et son environnement routier. Étant donné les nombreux dépassements automobiles réalisés avec succès quotidiennement, il semble cohérent de penser que les conducteurs sont en

mesure de percevoir ces possibilités d'action, accédant, dès lors, aux propriétés du système agent-environnement.

Toutefois, compte tenu des données accidentologiques présentées en introduction de ce manuscrit, la réussite des dépassements automobiles sur route secondaire est à reconsidérer. Eu égard aux causes accidentologiques déjà énoncées (e.g., alcool, somnolence,…), ne pourrait-on pas considérer que la prise en compte d'une multitude de propriétés participant de la richesse de l'information à percevoir ait atteint une certaine limite ? En effet, dans une situation entièrement écologique, le conducteur doit considérer dans un premier temps l'ensemble des limites d'action de son véhicule pertinentes pour effectuer son dépassement. Ces limites d'action pourront être relatives à la fois aux capacités d'accélération de son véhicule pour chacun des rapports de vitesse (e.g., en $4^{ème}$ et $5^{ème}$ vitesse), mais également relatives aux capacités d'action de freinage permettant alors au conducteur de réchapper d'une situation dangereuse. Toutes ces limites d'action seront à actualiser – i.e., principe de recalibration perceptive – en fonction du contexte de conduite par exemple (e.g., chargement du véhicule). Par ailleurs, d'autres limites d'action (e.g., limites d'adhérence du véhicule) pourront également s'ajouter aux précédentes selon les conditions environnementales de conduites (e.g., pluie, neige, soleil). Le principal intérêt de telles études serait de déterminer combien de limites d'action les conducteurs sont en mesure de prendre en compte à travers la perception d'*affordances* dimensionnées à l'action. Ces résultats nous permettraient de caractériser au mieux les limites prospectives de cette *affordance*.

Dans un second temps, le conducteur désireux d'initier un dépassement automobile devra prendre en compte les propriétés inhérentes au système agent-environnement. Ces dernières seront très probablement relatives aux propriétés cinématiques du véhicule à doubler (e.g., vitesse et accélération actuelle), ses dimensions physiques – i.e., largeur et longueur du véhicule – mais également les capacités d'action des véhicules venant en sens inverse. De cette relation entre propriétés du système agent-environnement et propriétés de l'agent représentant les limites d'action du conducteur émerge une *affordance* de dépassement qui doit être perçue afin d'initier et de réguler le dépassement. Il conviendra alors de questionner la capacité du conducteur à percevoir et à se recalibrer avec précision à cette *affordance* de dépassement en fonction d'un contexte routier évolutif, par exemple.

Ce questionnement fait état de la difficulté d'envisager le comportement du conducteur ancré dans son environnement tout en considérant de multiples propriétés, indépendantes les unes

des autres, dans un délai temporel très court. Toutefois, le cadre théorique des *affordances* conçoit aisément la complexité de situations naturelles, écologiques, puisque cette théorie en découle. En introduisant le concept d'information, J. J. Gibson (1986) donne accès à la compréhension des comportements individuels soumis à des contraintes spatio-temporelles réelles. L'information spécifiant la frontière entre ce qui est possible et ce qui ne l'est plus dans une situation donnée, permet à l'individu de percevoir directement ce que l'environnement lui offre en termes de possibilités d'action. Comme nous le verrons plus avant dans la prochaine partie, le concept d'invariant est la clé de futures recherches dont le but serait d'identifier le support optique de la sélection et de la régulation d'un mode d'action donné.

En effet, une dernière limite, transversale à l'ensemble des expérimentations menées dans ce projet de recherche, concerne la fonction causale de l'*affordance* dans les processus de sélection et de régulation de l'action. En démontrant que les conducteurs étaient sensibles à l'évolution des ratios *MSV*/*Vmax* et *MSA*/*Amax*, nous avons mis en évidence un possible rôle de ces *affordances* dans la prise de décision et – dans une moindre mesure – la régulation de l'action. Pour autant, pouvons-nous en conclure que de ces *affordances* dépend directement le processus de sélection et de régulation du dépassement ? A ce stade de nos recherches, nous ne pouvons pas l'affirmer. Toutefois, dans le cadre conceptuel de la théorie écologique, il est admis que les *affordances*, et a fortiori les propriétés dont elles dépendent, sont spécifiées par des invariants optiques présents dans le flux optique ambiant. C'est donc uniquement lorsque nous serons parvenus à identifier l'information optique utilisée par l'agent et à formaliser ses modalités de prise en compte que nous pourrons démontrer la fonction causale de l'information dans la sélection et la régulation de l'action. Cette démarche passe donc nécessairement par l'identification du support optique disponible lors de la réalisation d'un dépassement automobile.

Dans notre volonté d'identifier l'information spécifiant l'état du système agent-environnement, il est important de rappeler que cette information ne doit pas se concevoir exclusivement de façon uni-modale (e.g., modalité optique). Ce serait aller à l'encontre des fondements théoriques holistique de la théorie écologique. Il s'agit simplement d'une étape intermédiaire à la formalisation d'une information inter-modale (optique, acoustique, haptique, etc.) qui spécifierait les relations entre les configurations énergétiques ambiantes d'un environnement donné (Mantel, 2009; Stoffregen & Bardy, 2004; Stoffregen, Bardy, & others,

2001). Dans une situation de dépassement automobile, on pourrait ainsi envisager de formaliser des informations de nature acoustique émanant du bruit du moteur ou encore haptique issue d'une résistance particulière du volant consécutive à la faible adhérence des pneus, par exemple. Ce type de relation inter-configuration véhiculerait, en ce sens, une information extrêmement riche, sans ambiguïté pour le conducteur.

IV.1.2.1.2 *Les invariants optiques du dépassement automobile*

Il serait intéressant de nous questionner sur l'existence d'un invariant, ou d'une combinaison unique d'invariants optiques de haut niveau, capable de renseigner directement le conducteur sur la possibilité de dépasser ou non au cours du temps comme ont pu le faire Fajen et Matthis (2011) pour la marche à pied. En effet, cette étude livre quelques pistes de réflexion à travers la modélisation de la propriété *Vmin*, représentant la vitesse minimale de marche à atteindre pour franchir une porte coulissante sans encombre (Figure 38).

La formalisation de *Vmin* s'appuie sur une combinaison d'invariants optiques intégrant l'angle sous-tendu à la base de l'obstacle (γ), l'espace angulaire entre les deux obstacles coulissants (α), la hauteur des yeux de l'observateur (E) ou encore l'angle visuel local sous-tendu par l'intérieur et l'extérieur des bords des deux obstacles (φ). Les auteurs ont ainsi formalisé différents invariants optiques associés à :

- la distance entre l'observateur et l'espace inter-obstacle, spécifiée optiquement par la hauteur des yeux de l'observateur : $1/\tan\gamma$;
- la vitesse à laquelle les deux obstacles se rejoignent, spécifiée optiquement par la hauteur des yeux de l'observateur : $\dot{\gamma}/\sin^2\gamma$
- le temps restant jusqu'à la fermeture de l'espace inter-obstacle : $\left(\frac{\dot{\varphi}}{\sin\varphi} - \frac{\dot{\alpha/2}}{\tan(\alpha/2)}\right)^{-1}$
- la taille de l'espace inter-véhiculaire (g), spécifiée optiquement par la hauteur des yeux de l'observateur : $[2\times\tan(\alpha/2)] / \tan\gamma$

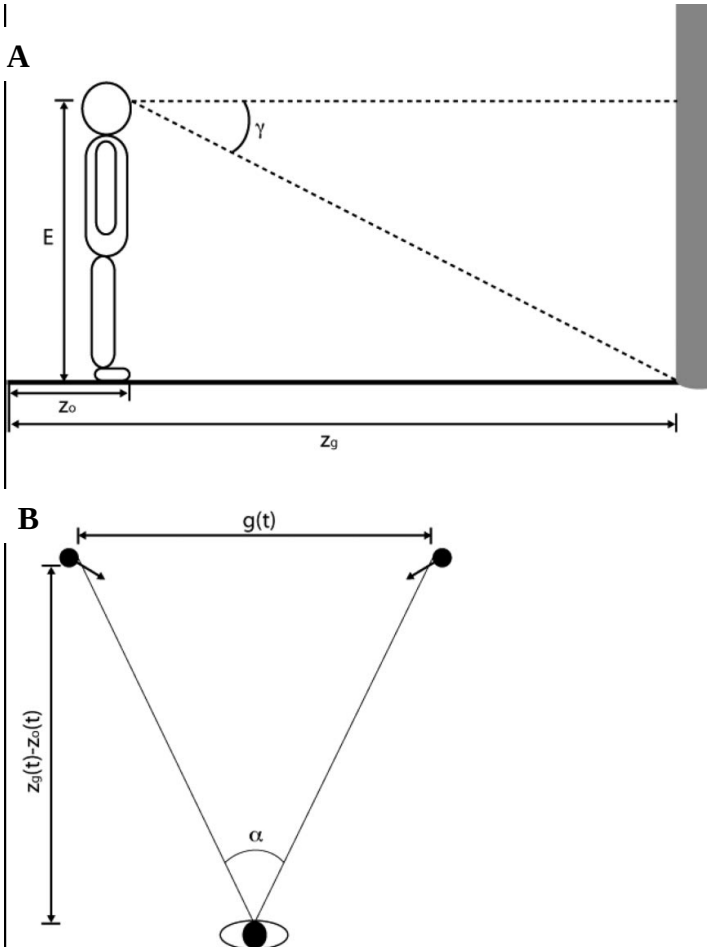


Figure 38: A: Vue de côté d'un observateur et d'un obstacle cylindrique, montrant l'angle sous-tendu à la base de l'obstacle (γ) et la hauteur des yeux (E). B: Vue plongeante d'un observateur et deux obstacles coulissants, montrant l'espace angulaire (α), la taille de l'espace (*g*), et la distance de l'espace (*zg – zo*).

L'étude de Fajen et Matthis (2011) représente ainsi un véritable socle pour modéliser optiquement les propriétés du système agent-environnement (*MSV* et *MSA*). Bien que la tâche utilisée ici diffère d'une tâche de dépassement automobile, certains éléments pourraient être aisément transposables : un espace inter-véhiculaire, la taille de l'espace inter-véhiculaire, la vitesse à laquelle l'espace inter-véhicule se referme, la hauteur des yeux du conducteur, l'angle sous-tendu à chacun des véhicules ou encore le temps restant jusqu'à la fermeture de l'espace inter-véhiculaire. Toutefois, à la différence de l'expérimentation de Fajen et Matthis, les conducteurs de nos expérimentations avaient la possibilité d'évoluer latéralement et à leur guise, durant le dépassement automobile. Cette liberté de mouvement apporte une complexité non négligeable dans la modélisation des invariants optiques potentiels. En effet, chaque phase du

dépassement (poursuite, dépassement, rabattement ou renoncement) nécessiterait une nouvelle modélisation des invariants optiques en jeu. Par exemple, un conducteur situé à l'arrière du véhicule leader (à doubler) ne pourrait pas utiliser la spécification optique de l'espace inter-véhiculaire (véhicule leader-véhicule obstacle). Par ailleurs, la spécification optique du temps restant avant la collision avec le véhicule obstacle serait obstruée par la proximité du véhicule leader à doubler. De plus, durant son dépassement, le conducteur est amené à regarder dans ses rétroviseurs afin d'estimer le moment opportun pour se rabattre. Comment modéliser un invariant optique à partir d'un flux optique contraire (projeté dans le rétroviseur) ?

Ainsi, bien que la modélisation d'invariants optique lors d'une tâche de franchissement d'obstacle ne soit pas aussi complexe, a priori, que dans une tâche de dépassement automobile, les invariants optiques modélisés par Fajen et Matthis (2011) sont des candidats non négligeables à la spécification des *affordances* de dépassement.

Dans nos trois expériences, un certain nombre d'*affordances* de dépassement ont été formalisées à partir de propriétés relatives aux cinématiques des véhicules. De prime abord, ces multiples formalisations pourraient entrer en contradiction avec la thèse originelle de J. J. Gibson (1986). C'est ce que soulignaient Fodor et Pylyshyn (1981) dans leur critique conceptuelle formulée à l'encontre de l'approche écologique. Toutefois, la formalisation de plusieurs *affordances* de dépassement n'est en rien contradictoire avec le postulat gibsonien. En effet, pour J. J. Gibson la notion d'*affordance* consiste à identifier l'objet de la perception, en l'occurrence les possibilités de dépasser, à une seule et unique combinaison d'invariants. D'après J. J. Gibson (1986), cette constance du substrat optique est garante de sa pluralité d'utilisations. Ce postulat gibsonien majeur permet ainsi d'expliquer la formalisation de plusieurs *affordances* de dépassement dimensionnées à l'action. Ces dernières ne font que traduire la diversité des manipulations possibles d'un même support optique invariant.

Dans le cadre de ce travail de thèse, l'objectif majeur était d'établir et de valider, dans un premier temps, la formalisation mathématique d'*affordances* de dépassement définies par des propriétés cinématiques (vitesse et accélération du véhicule). À un niveau plus microscopique, l'étape suivante consistera ainsi à identifier le support optique des propriétés relationnelles du système agent-environnement et des propriétés de l'agent mises au jour. Nous pourrions agir dès

lors directement aux origines perceptives de l'*affordance* afin d'identifier plus précisément les invariants optiques indispensables à la réussite d'un dépassement automobile et comprendre les modalités de leurs prises en compte. Une fois modélisés, les invariants optiques pourront être manipulés (Fajen, 2005a, 2005c, 2007b; Fajen & Matthis, 2011) afin de caractériser le plus fidèlement possible leurs influences sur la sélection et la régulation du dépassement automobile.

CONCLUSION :

Jusqu'à présent, nous avons évoqué la nécessité d'identifier et de modéliser le support informationnel utilisé par le conducteur lors du dépassement automobile. Toutefois, comme nous l'avons souligné dans la partie précédente, s'en tenir à cette étape ne permet en aucun cas de démontrer une fonction causale de l'information dans les processus de prises de décision et de régulation de l'action. Il apparaît alors indispensable de s'interroger sur les modalités de prise en compte de cette information. Tout au long du manuscrit, nous avons insisté sur la nécessité d'appréhender le dépassement automobile en considérant des propriétés du système agent-environnement d'ordre cinématique (vitesse et accélération du véhicule conduit) prises en référence aux propriétés de l'agent (vitesse et accélération maximale). Nous ne nous sommes toutefois jamais interrogés sur la capacité des conducteurs à exploiter et prélever une *affordance* de dépassement. Ce questionnement fait donc écho à la question de l'individu percevant. En d'autres termes, la capacité de prélever et d'exploiter des propriétés du système agent-environnement en référence à des propriétés de l'agent est-elle inchangée entre les individus ?

Denis Proffit a été un des premiers chercheurs à considérer la perception des *affordances* comme incarnée dans des propriétés physiologiques liées à la fatigue (Proffitt, Bhalla, Gossweiler, & Midgett, 1995; Proffitt, Stefanucci, Banton, & Epstein, 2003) ou psychologiques liées à la peur (Proffitt, 2006) ou à l'humeur (Riener, Stefanucci, Proffitt, & Clore, 2003, 2011). Dans une suite de travaux effectués sur la perception des pentes, il montre que l'inclinaison apparente d'une pente (e.g., une colline) est perçue comme plus prononcée par les sujets lorsqu'ils sont fatigués, chargés par un lourd sac à dos, ou effrayés par exemple. Ces résultats

mettent en évidence, notamment, l'influence de propriétés d'ordre psychologique dans la perception des possibilités de gravir une pente avec plus ou moins d'efforts.

Un dernier aspect reste ainsi à considérer dans la modélisation d'une *affordance* de dépassement : les propriétés d'ordre psychologique. Ces dernières peuvent être représentées par la personnalité du conducteur. Alors que de nombreuses études (Cestac, Paran, & Delhomme, 2011; Delhomme, 2002; Delhomme, Chaurand, & Paran, 2012; Ulleberg & Rundmo, 2002, 2003) ont démontré l'influence de telles propriétés psychologiques dans le comportement du conducteur de manière générale, il serait intéressant de discuter de leurs prises en compte dans la perception d'une *affordance* dimensionnée à l'action. Des conducteurs aux profils de personnalité distincts perçoivent-ils une *affordance* identique ? La personnalité des conducteurs influencerait-elle au contraire le prélèvement de l'information optique ou encore la perception de leurs propres possibilités d'action ?

IV.1.3 Personnalité et théorie des *affordances* : quelles articulations ?

IV.1.3.1 Exploitation des affordances et traits de personnalité, deux réalités interdépendantes ?

La conception gibsonienne de l'*affordance* s'est construite en opposition au courant gestaltiste quant à la place à accorder à la subjectivité de l'acte perceptif et moteur. J. J. Gibson (1986) s'est toujours attaché à ne pas inclure la dimension phénoménale dans la perception d'une *affordance*. Ce questionnement semble pourtant légitime compte tenu des effets avérés de la personnalité sur la prise de décision par exemple (cf. partie I.1.2.2).

Dans une étude précédente, Bootsma et al. (1992) ont été les premiers à interroger l'influence des propriétés psychologiques, telles que l'anxiété, sur la capacité des individus à percevoir une *affordance* d'atteignabilité. Les chercheurs ont mesuré l'influence de deux formes d'anxiété – l'anxiété-trait et l'anxiété-état – sur l'atteinte d'une cible. L'anxiété-trait est considéré comme un trait de personnalité durable de l'individu. L'anxiété-état caractérise quant à elle un état émotionnel passager qui va émerger d'une situation particulièrement stressante. Afin de

classer les participants par groupe de niveau d'anxiété trait (niveau faible, normal et élevé), les questionnaires STAI[17] (*State-Trait Anxiety Inventory*) et ATL (*Adolescent Temperament List*[18]) leur ont été soumis à la fois avant le test et immédiatement après. Les participants devaient ensuite juger l'atteignabilité de balles avec leur seul bras. Les balles apparaissaient dans le plan frontal des participants et provenaient aléatoirement de leur gauche ou de leur droite. Chaque groupe était soumis à une condition contrôle dans laquelle aucune situation anxieuse était présente, et une seconde condition dans laquelle une situation particulièrement stressante était provoquée (anxiété-état).

De manière générale, quel que soit le niveau d'anxiété-trait des participants, ces derniers ont surestimé de 8.6% l'atteignabilité maximale d'une balle. Les chercheurs ne trouvent donc pas d'influence de l'anxiété-trait ou état sur l'exactitude des jugements. Toutefois, même si la précision des jugements n'indique aucune influence de l'anxiété-trait, elle reste affectée par l'anxiété-état. En d'autres termes, les participants sont moins précis dans la condition anxiété-état que dans la condition contrôle. Les résultats sont ainsi en ligne avec les propos de J. J. Gibson[19] (1986) puisqu'ils mettent en évidence que l'anxiété des participants ne modifie pas l'*affordance* en elle-même, mais plutôt leur capacité à détecter et à prélever avec *précision* l'information spécifiant l'*affordance* d'atteignabilité.

Il semble toutefois légitime de se demander si cette observation est toujours valable dans un contexte éminemment écologique, en l'occurrence lors d'un dépassement automobile. D'autre part, démontrer une absence d'influence de l'anxiété-trait sur l'exactitude et la précision des jugements d'atteignabilité d'une cible suffit-elle à écarter toute remise en cause du principe gibsonien d'*affordance* en lien avec la prise en compte des propriétés psychologiques ?

[17] Spielberger, Gorsuch, & Lushene (1970)

[18] Feij & Kuiper (1984)

[19] "*The affordance of something does not change as the need of the observer changes. The observer may or may not perceive or attend to the affordance, according to his needs, but the affordance, being invariant, is always there to be perceived. An affordance is not bestowed upon an object by a need of an observer and his act of perceiving it. The object offers what it does because it is what it is*" (J. J. Gibson, 1986, p. 139).

CONCLUSION :

De nombreuses études (Farah et al., 2009; Farah & Toledo, 2010; Matthews et al., 1998; Mohaymany, Kashani, & Ranjbari, 2010b; Pollatschek & Polus, 2005; Redelmeier & Tibshirani, 2000; Shinar, 1998; Shinar & Compton, 2004; Stephens & Groeger, 2011; Toledo & Farah, 2011), non décrites pour la plupart dans cette partie, relatives aux dépassements automobiles tendent à montrer que la personnalité du conducteur est un élément pertinent à considérer dans la réalisation d'un dépassement. L'influence d'une telle propriété psychologique nous amène à repenser la dualité originelle de l'*affordance* et de la psychologie de l'agent. Dans une quatrième et dernière expérience, nous avons ainsi questionné l'influence des traits de personnalité sur la prise de décision lors d'un dépassement automobile. La problématique de cette étude réside dans la formalisation des traits de personnalité au sein d'une *affordance* de dépassement dimensionnée à l'action. Il s'agit à présent d'en discuter les enjeux afin de proposer un nouveau regard sur la nature fonctionnelle du système agent-environnement.

IV.1.3.2 Au-delà des limites conceptuelles écologiques : vers une nouvelle formalisation de la subjectivité/objectivité de la perception

Dans un souci de clarté et de cohérence d'ensemble, la quatrième et dernière expérimentation[20] n'est abordée qu'à ce stade du manuscrit. Elle est en effet l'objet d'une discussion sur la prise en compte de propriétés psychologiques, i.e., des traits de personnalité dans la formalisation d'une *affordance* du dépassement automobile. Il semble intéressant de se demander si les traits de personnalité, à l'image des propriétés biomécaniques ou encore des capacités d'accélération, peuvent être considérés comme des propriétés de l'agent (e.g., limites d'action) à prendre en compte lors du dépassement automobile. Si tel est le cas, il convient de déterminer de quelle manière ces propriétés d'un nouveau type peuvent être formalisées. Ce questionnement est non seulement novateur au sein de la psychologie écologique mais aussi

[20] Cette dernière expérimentation a fait l'objet d'une collaboration scientifique avec Cécile Martha, membre de l'équipe Contextes, Motivation et Comportements au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement.

déterminant dans la compréhension des comportements individuels lors de dépassements automobiles. En effet, si l'*affordance* renseigne sur la dangerosité d'une situation (E. J. Gibson & Walk, 1960) et si les traits de personnalité modifient la perception de dangerosité d'une situation automobile (Matthews et al., 1998; Pollatschek & Polus, 2005; Redelmeier & Tibshirani, 2000; Shinar, 1998; Shinar & Compton, 2004; Stephens & Groeger, 2011) cela signifierait-il que les individus perçoivent des *affordances* de dépassement associées à leurs traits de personnalité ? Ou alors, comme a pu le démontrer Bootsma *et al*. (1992), la personnalité modifierait-elle la précision du prélèvement de l'information ? Par ailleurs, comment la théorie des *affordances* peut-elle rendre compte des différences de comportements prédites en fonction des profils de personnalité identifiés par la psychologie différentielle ?

La plupart des psychologues utilisent la notion de « trait de personnalité » pour décrire une tendance habituelle à être, à se comporter dans diverses situations. Le trait de personnalité est de ce fait qualifié de structural. Nous nous intéresserons principalement aux traits psychologiques suivants : le Névrotisme, qui est la tendance à l'instabilité émotionnelle et souvent aux plaintes physiques (Eysenck, 1990); l'Extraversion, définie comme la tendance à établir des contacts sociaux et la fréquence élevée de conduites à risque visant à atteindre un niveau d'éveil désiré (Eysenck & Eysenck, 1985) ; la Méticulosité, inversement reliée à des comportements à risques et agressifs (Eysenck, 1994; Goldberg, 1990). La combinaison des traits Névrosisme, Extraversion, Méticulosité permet de dégager quatre profils de personnalité types (cf. Tableau 3) à l'intérieur desquels deux profils sont associés à des comportements à risques (individus Impulsifs et Hédonistes, que nous désignerons par le substantif Audacieux). À l'inverse, les deux autres profils sont associés à des comportements prudents (individus Soucieux et Sceptiques que nous désignerons par le substantif Prudents) vis-à-vis, par exemple, de la consommation de drogue (Vollrath & Torgersen, 2002), du risque en matière de sexualité (Vollrath & Torgersen, 2008) ou du risque sportif (Castanier, Scanff, & Woodman, 2010). Ces profils de personnalité constituent des propriétés indépendantes au cours de cette étude.

Tableau 3 : Profils de personnalité associés à des comportements à risque et à des attitudes prudentes en fonction de la combinaison des traits de personnalité : névrotisme, extraversion et méticulosité selon Vollrath et Torgersen (2002).

Attitude vis-à-vis du risque	Substantif	Profils	Score sur le trait Névrotisme	Score sur le trait Extraversion	Score sur le trait Méticulosité
Comportements à risques	Audacieux	Impulsif	Élevé	Élevé	Faible
		Hédoniste	Faible	Élevé	Faible
Comportements prudents	Prudents	Soucieux	Élevé	Faible	Élevé
		Sceptique	Faible	Faible	Élevé

Nous prétendons que choisir un mode d'action approprié (*e.g,* dépasser ou poursuivre) impliquerait de percevoir les propriétés de l'environnement en référence à des capacités d'action d'ordre cinématique (*Vmax*) mais aussi psychologique (profil de personnalité). Nous postulons que les conducteurs évoluant dans des situations de dépassement similaires se comporteront différemment selon leur profil de personnalité. Les conducteurs présentant des profils de personnalité Audacieux (i.e., Impulsif ou Hédoniste) choisiront de s'engager dans des manœuvres de dépassement jusqu'à une sollicitation critique de leurs capacités d'action (i.e., MSV/V_{MAX} proche de 100%). À l'inverse, les conducteurs présentant des profils de personnalité Prudents (i.e., Soucieux ou Sceptiques) cesseront de dépasser avant sollicitation critique de leurs capacités d'action.

Vingt-quatre individus (9 femmes et 15 hommes) ont été sélectionnés parmi un groupe de 207 conducteurs titulaires du permis B depuis 1 an et demi minimum (âge moyen 23.3 ans ± 3.8). La sélection des sujets Audacieux et Prudents a été réalisée sur la base des réponses à des questionnaires[21] mesurant i) un corrélat psychologique de la prise de risque spécifique à la

[21]Dans un premier temps, les profils hédonistes et impulsifs et les profils soucieux et sceptiques ont été identifiés en les situant par rapport à la médiane (scores élevés versus scores faibles) de la distribution des scores obtenus sur les 207 conducteurs Dans un deuxième temps, afin de discriminer plus finement les sujets au regard de leur propension à prendre des risques, nous avons sélectionné uniquement les « Audacieux » ayant un score situé dans les 30 derniers percentiles des traits de personnalité RSV, PCCR, et RIS, et les « Prudents » ayant un score situé dans les 30 premiers percentiles des traits de personnalité RSV, PCCR, et RIS. Cette sélection des sujets selon leur profil de personnalité répondait ainsi à notre objectif de sélectionner deux groupes, « Audacieux » versus « Prudents », pour notre phase expérimentale.

conduite routière, à savoir la recherche de sensations au volant –-RSV, 7 items, α = 0.70 – (Delhomme, 2002; Delhomme, Verlhiac, & Martha, 2009) ; ii) des corrélats psychologiques généraux de la prise de risque, à savoir la préférence pour des choix et conduites risqués –PCCR, 11 items, α = 0.67 – (Hatfield & Fernandes, 2009), et la recherche impulsive de sensations –RIS, 18 items, α = 0.74 – (Zuckerman, Michael, Joireman, Teta, & Kraft, 1993); iii) les traits de personnalité Névrosisme (12 items, α = 0.79), Extraversion (12 items, α = 0.76), et Méticulosité (11 items, α = 0.84) du *NEO- Five Factors Inventory- Revised* (NEO-FFI-R, Vollrath & Torgersen, 2008). Chacun de ces questionnaires utilisait des échelles ordinales de type Likert en cinq points pour quantifier et ordonner les scores obtenus, excepté le RIS qui utilisait une échelle dichotomique (Vrai/Faux). Par la suite, nous avons spécifiquement centré nos analyses sur l'étude du rôle du trait de personnalité recherche de sensations au volant[22] (T_{RSV}), au sein de chacune des populations : Audacieux et Prudents avec des vitesses maximales (*Vmax*) de 25 et 32.5 m/s.

La tâche consistait à atteindre la ligne d'arrivée en perdant le moins de temps possible tout en évitant d'entrer en collision avec les éléments matériels du monde virtuel. Pour cela les conducteurs devaient choisir le comportement le plus opportun : doubler la voiture meneuse et se rabattre devant l'obstacle ou bien suivre la voiture meneuse.

Les courbes psychométriques moyennes des fréquences de dépassement pour les conducteurs Audacieux (-o-) et Prudents (-) sont représentées sur la Figure 39, selon qu'elles aient été rapportées en unité extrinsèque (la *MSV*, exprimée en m/s, s'échelonnant de 2.5 à 35 m/s, panneau A), intrinsèque (*MSV/Vmax*, s'échelonnant de 0 à 140 %, panneau B) et intrinsèque intégrant le trait psychologique de Recherche de Sensations au Volant – T_{RSV} – (*MSV/(Vmax* / T_{RSV}*))* s'échelonnant de 0 à 300 %, panneau C).

[22]Ce trait T_{RSV} a été préféré aux autres traits pour exprimer les probabilités d'occurrence des comportements automobiles en fonction de l'*affordance* de dépassement, en raison de sa spécificité au regard du domaine de la conduite routière. Le T_{RSV} sera uniquement utilisé dans le calcul de l'*affordance*.

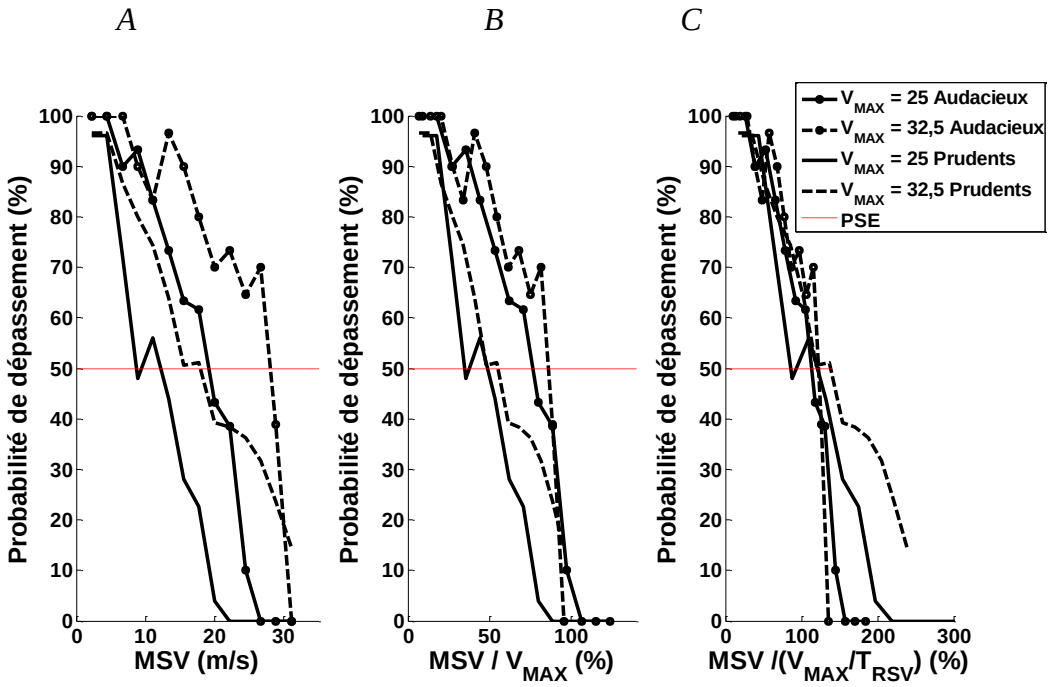


Figure 39 : Probabilités moyennes d'occurrence des comportements de dépassement (exprimées en %) en fonction d'une échelle de mesure extrinsèque (*MSV*, panneau A), d'une échelle de mesure intrinsèque (*MSV*/*Vmax*, panneau B) et d'une échelle de mesure intrinsèque intégrant la *RSV* (*MSV*/(*Vmax* /T_{RSV}), panneau C). Les symboles (-o-) représentent les probabilités moyennes des conducteurs Audacieux et les symboles (-) celles des conducteurs Prudents. Parmi ces groupes, les traits pleins et discontinus représentent respectivement les comportements réalisés avec des voitures bridées à 25 m/s et à 32.5 m/s. Une probabilité égale à 100% signifie que les conducteurs ont choisi de dépasser dans tous les essais de la condition concernée. L'intersection entre la ligne pointillée rouge et les courbes psychophysiques représente le Point d'Égalisation Subjective (PSE, i.e., la valeur de *MSV*, du ratio *MSV*/*Vmax* ou bien du ratio *MSV*/(*Vmax*/T_{RSV}) pour laquelle un comportement donné est réalisé pour 50% des essais).

Une observation qualitative du panneau A de la Figure 39 révèle que les valeurs de PSE exprimées en fonction d'une mesure extrinsèque (*MSV* en m/s) et observées pour G1A (« *Audacieux* », *Vmax* = 25 m/s) sont différentes des valeurs observées pour G1B (« *Audacieux* », *Vmax* =32.5 m/s) (17.80 vs. 24.75 m/s). De la même manière, les valeurs de PSE observées pour G2A (« *Prudents* », *Vmax* =25 m/s) sont différentes des valeurs observées pour G2B (« *Prudents* », V_{MAX} =32.5 m/s) (11.20 vs. 19.03 m/s).

Par ailleurs, une observation qualitative du panneau B de la Figure 39 révèle que les valeurs de PSE exprimées en fonction d'une mesure intrinsèque (*MSV/Vmax* en %) relevées pour G1A (« *Audacieux* », *Vmax* =25 m/s) sont identiques aux valeurs observées pour G1B (« *Audacieux* », *Vmax* =32.5 m/s) (71.20 vs. 76.15 %). De même, les valeurs de PSE relevées pour G2A (« *Prudents* », *Vmax* =25 m/s) sont similaires aux valeurs observées pour G2B

(« *Prudents* », *Vmax* =32.5 m/s) (44.8 vs. 58.5 %). En revanche, les valeurs de PSE exprimées en fonction d'une mesure intrinsèque (*MSV/Vmax* en %) observées pour G1 et G2 sont très différentes (73.67 vs 51.65 %).

L'existence d'une telle différence comportementale pose une question théorique fondamentale pour la théorie des *affordances*. Pourquoi, dans cette étude, les différences comportementales entre les conducteurs ne s'annulent-elles pas lorsque la vitesse minimale pour réussir le dépassement est dimensionnée intrinsèquement aux capacités d'action réelles du conducteur (*MSV*/*Vmax*) ? Nous avons voulu étudier spécifiquement le rôle du trait « recherche de sensations au volant » (T_{RSV}), en faisant l'hypothèse que l'*affordance* permettant de percevoir les possibilités de dépassement s'exprimerait de la sorte : *MSV*/(*Vmax*/T_{RSV}).

Enfin, conformément à notre hypothèse, une observation qualitative du panneau C de la Figure 39 révèle que les valeurs de PSE exprimées en fonction d'une mesure intrinsèque intégrant le trait psychologique de Recherche de Sensations au Volant (T_{RSV}) (*MSV/(Vmax /*T_{RSV}*)*, en %) observées pour G1A (*« Audacieux »*, *Vmax* = 25 m/s), G1B (*« Audacieux »*, *Vmax* =32.5 m/s), G2A (« *Prudents* », *Vmax* =25 m/s) et G2B (« *Prudents* », *Vmax* =32.5 m/s) sont identiques (108 vs 110 vs 113 vs 117 %).

En conclusion, les observations qualitatives des fréquences de dépassement représentées selon une échelle de mesure intrinsèque intégrant le trait psychologique de Recherche de Sensations au Volant – T_{RSV} – *(MSV/ (Vmax /* T_{RSV}*), en %)* semblent indiquer, dans le cadre d'une première analyse, que la sélection d'un mode d'action dans des situations de dépassement est la résultante d'une triple interaction entre les propriétés de la relation conducteur-environnement, les capacités d'action des véhicules conduits et les profils de personnalité des conducteurs. Ces derniers doivent ainsi être considérés comme de véritables limites d'action définies non pas uniquement à partir de propriétés cinématiques du véhicule mais à partir de propriétés psychologiques du conducteur. Une même *affordance* de dépassement semble en ce sens être perçue avec exactitude et précision – cf., les courbes psychophysiques du dépassement – par les conducteurs aux profils de personnalité distincts (Bootsma *et al.*, 1992). Seule l'exploitation de cette *affordance* diffère. Des analyses statistiques ultérieures devront être menées afin de confirmer ces premières observations qualitatives.

IV.2 Perspectives : vers quelles applications ?

IV.2.1 Formation et apprentissage des jeunes conducteurs dans des situations à fortes contraintes spatio-temporelles

Les résultats des précédentes études peuvent avoir des applications directes sur l'apprentissage de la conduite automobile. Comme en attestent les statistiques accidentologiques auprès des populations de jeunes conducteurs, la maîtrise du véhicule conduit et la bonne évaluation des capacités perceptivo-motrices sont souvent la cause des accidents. Malgré ce constat, posé depuis plusieurs années, la méthode d'apprentissage automobile n'a que très peu évolué. Une nouvelle réforme du permis de conduire a fait son apparition au cours de l'année 2014. La seule amélioration notable concerne la volonté du gouvernement de promouvoir la conduite accompagnée. L'apprentissage anticipé de la conduite devient ainsi accessible dès 15 ans, contre 16 ans auparavant. Les candidats au permis de conduire pourront passer le permis dès 17 ans et demi afin de pouvoir conduire au premier jour de leur majorité. Même si cette réforme semble aller dans le bon sens, il est indispensable d'agir plus en amont de l'apprentissage automobile.

En effet, alors que les manœuvres de dépassement n'occupent que 5% de toutes les manœuvres effectuées lors de la formation des apprentis conducteurs (Groeger & Clegg, 1994), ces derniers doivent être capables, à l'issue de leur formation, de décider de la possibilité d'un dépassement, avec des véhicules différents de ceux utilisés pendant la période d'apprentissage. Pourquoi les centres d'apprentissage automobile n'abordent-ils pas une manœuvre aussi difficile, impliquant la maîtrise du véhicule dont devra faire preuve le conducteur ainsi que la prise en compte des propriétés du système agent-environnement, au cours de l'apprentissage automobile ?

Dans la majorité des auto-écoles, l'accent est ainsi mis sur la maîtrise du véhicule dans des tâches telles que les créneaux, le freinage d'urgence ou encore l'insertion dans un trafic, typiquement dans le franchissement d'un rond-point. En atteste la réalisation obligatoire durant l'épreuve pratique du permis B de deux des sept manœuvres suivantes, dont une au moins est exécutée en marche arrière : marche arrière en ligne droite ; marche arrière en arrondi ou en angle ; rangement en créneau ; rangement en épi ; rangement en bataille ; demi-tour ; freinage

pour s'arrêter avec précision. En s'appuyant sur ce travail de thèse, nous mettons en exergue la nécessité de personnaliser l'apprentissage du futur conducteur en caractérisant son profil de personnalité et en évaluant ses capacités de détection d'une *affordance* dimensionnée à l'action. Par exemple, nous pensons qu'il serait indispensable au moniteur auto-école d'orienter majoritairement l'apprentissage d'un futur conducteur, caractérisé a priori comme prudent, vers la prise en compte des limites d'action de son véhicule.

La catégorisation des apprentis conducteurs à leur arrivée dans l'auto-école pourrait être mise en place à l'aide du questionnaire de personnalité développé par Cécile Martha et validé dans notre quatrième et dernière étude. Cette étape de catégorisation pourrait être suivie par une brève session évaluative dans un simulateur de conduite. À l'aide de tâches bien déterminées, une note pourrait être donnée à l'apprenti conducteur relative à la bonne détection d'une *affordance* de dépassement. Une fois le profil de personnalité dressé et les capacités perceptivo-motrices de l'apprenti conducteur évaluées, le moniteur pourrait proposer une dynamique d'apprentissage personnalisée, associée à un nombre d'heures spécifiques.

Par ailleurs, l'évaluation du degré de perception d'une *affordance* de dépassement à l'aide de tests perceptivo-moteurs en simulateur de conduite pourrait grandement bénéficier à l'apprenti conducteur. En effet, pourquoi ne pas imaginer comme prérequis à toute offre d'apprentissage automobile, un seuil à atteindre en simulateur de conduite attestant de la bonne perception des capacités d'action de l'individu ? Le simulateur de conduite pourrait ainsi proposer tout un panel d'exercices perceptivo-moteurs plus ou moins liés à la conduite automobile. Des études récentes ont déjà mis en évidence les bénéfices d'un entraînement en simulateur de conduite sur la perception du risque et le comportement automobile (Isler, Starkey, & Sheppard, 2011).

Comme nous l'avons abordé au cours de ce manuscrit, la perception d'une *affordance* de dépassement sous-jacente à une prise de décision correcte, est un prérequis indispensable à la réalisation d'un dépassement automobile en toute sécurité. L'apprentissage automobile devrait ainsi être davantage centré sur la maîtrise du dialogue perceptivo-moteur qui sous-tend la perception des possibilités d'action du véhicule conduit, et de ce fait la perception d'une *affordance* de dépassement. Entre 18 et 23 ans, ce dialogue perceptivo-moteur (conducteur/véhicule-environnement) n'est pas encore totalement établi. Dès lors, un apprentissage personnalisé ciblant précisément les compétences perceptivo-motrices du futur

jeune conducteur ne peut être que bénéfique pour améliorer de manière significative la détection d'une *affordance* de dépassement.

IV.2.2 Pour un système d'aide au dépassement personnalisé

Dans la littérature scientifique, de nombreuses études se sont déjà penchées sur l'automatisation des manœuvres de dépassement ou encore sur l'élaboration de systèmes avancés d'aide au dépassement – i.e., *Advanced Driver Assistance Systems*, ADAS – avec plus ou moins de réussite. Différentes propositions ont été formulées pour intégrer les propriétés pertinentes au sein du modèle d'aide au dépassement automobile.

Suite à une analyse en condition réelle du dépassement automobile, Hegeman, Brookhuis, Hoogendoorn, et al. (2005) et Hegeman, Brookhuis, & Hoogendoorn (2005) ont mené des recherches pour tenter d'élaborer un système d'aide au dépassement. Dans leur étude, les chercheurs partent de l'analyse des ADAS déjà disponibles sur le marché (Figure 40). Le point commun de ces systèmes d'aide au conducteur est d'améliorer la sécurité de la conduite automobile. Par la suite, les chercheurs ont vérifié en situation de conduite réelle l'efficacité de l'ADAS vis-à-vis du nombre de sous-tâches[23] pris en compte durant le dépassement automobile. Les chercheurs observent que presque toutes les sous-tâches de la manœuvre de dépassement peuvent être assistées avec les fonctionnalités existantes de l'ADAS. En revanche, pour les tâches les plus complexes telles que juger la distance existante entre son véhicule et le véhicule venant en sens inverse ou contrôler les déviations ou variations du véhicule à doubler – Hegeman, Brookhuis, Hoogendoorn, et al. (2005, p. 293) –, les fonctionnalités de l'ADAS ne sont plus adaptées.

Compte tenu des limitations fonctionnelles des systèmes d'aide au dépassement existant, Hegeman *et al.* (2007) ont alors entrepris une expérimentation en simulateur de conduite pour tester le fonctionnement et valider la conception d'une nouvelle aide standardisée au dépassement (Figure 40). Sur une route nationale à deux voies de circulation, simulée virtuellement, 24

[23] À partir de leurs précédentes observations en situation de dépassement réelle, les chercheurs ont défini la manœuvre de dépassement en 5 phases, dans lesquelles plus de 20 sous-tâches sont distinguées telle que l'estimation de la distance entre le véhicule sujet et le véhicule venant en sens inverse.

conducteurs ont conduit 15 minutes avec et sans le prototype d'aide au dépassement. L'aide au dépassement calculait le temps disponible pour réaliser une manœuvre de dépassement, en prenant en compte le véhicule à doubler et ceux arrivant en sens inverse. La marge de sécurité est ajoutée dans le but de garder une distance raisonnable avec les véhicules venant en sens inverse, une fois le dépassement réalisé. Un temps de 3 secondes est communément utilisé comme marge de sécurité (Lee, Olsen, & Wierwille, 2004; Van Der Horst & Bakker, 1993). D'après Hoogendoorn et Minderhoud (2001), un temps de contact inférieur à 3 secondes est considéré comme inconfortable par les conducteurs. En l'absence de risque pour effectuer le dépassement, le dispositif d'aide affichait un voyant vert aux conducteurs. À l'inverse, lorsque le dépassement s'avérait être dangereux, une lumière rouge s'affichait.



Figure 40 : Exemples d'interface Homme-Machine dans l'assistance au dépassement. L'interface de gauche a été utilisée dans Hegeman et al. (2007). Illustration tirée de Hegeman, Tapani, et Hoogendoorn (2009)

Hegeman et al. (2007) observent que le nombre des manœuvres de dépassement effectué dans la configuration de base (i.e., sans aide au dépassement) ne variait pas significativement d'une configuration dans laquelle le conducteur était assisté. Les conducteurs masculins ont, en revanche, doublé significativement plus que les conducteurs féminins. Certains conducteurs ont pensé que l'assistant était trop prudent (il affichait un signal rouge alors que la situation ne comportait pas de risque pour le dépassement), et d'autres conducteurs ont pensé qu'il n'était pas assez sécurisant (il affichait un signal vert alors que le dépassement était risqué). Les fréquences de dépassement des conducteurs n'étaient pas significativement corrélées aux scores de recherche de sensations (Jonah, 1997; Zuckerman, 1994), lesquelles étaient hautement corrélées à la conduite dangereuse (Jonah, 1997). Hegeman *et al.* (2007) en ont conclu que, selon les performances des manœuvres de dépassement, il était possible de concevoir un système d'aide au

dépassement standardisé. D'après les chercheurs, il devrait donc être possible d'améliorer le système pour mieux répondre à la perception des différents conducteurs.

Au vu des résultats obtenus avec le système d'aide au dépassement proposé, des doutes peuvent être émis sur la pertinence d'une telle assistance. En effet, les conducteurs ne semblent pas assistés, aidés, dans ce type de manœuvre, contrairement à l'objectif initial énoncé. Ce type d'ADAS met en exergue la nécessité de personnaliser les propriétés intégrées dans le système d'aide au dépassement afin qu'ils soient adaptés au dialogue perceptivo-moteur de chacun des conducteurs.

CONCLUSION :

Comme le montre la littérature scientifique étudiée dans ce manuscrit, aucun système d'aide au dépassement automobile n'est encore applicable, de façon efficace, en situation réelle de conduite. Les modèles d'aide au dépassement présentés ont le défaut majeur de ne pas s'adapter aux profils de conduites de l'individu mais plutôt d'imposer des vitesses ou des temps prescrits de façon absolue. Par exemple, les ADAS ne sont pas capables de faire la distinction entre un conducteur en mesure d'exploiter en grande partie les capacités d'action du véhicule conduit et un conducteur caractérisé par une exploitation minimale des capacités d'action. Comme nous l'avons vu dans la quatrième expérimentation, cet aspect est pourtant indispensable dans la réalisation d'un dépassement automobile puisqu'il va déterminer la prise de décision du conducteur. La marge de sécurité appliquée à l'ADAS a de forte probabilité de ne pas convenir au comportement « naturel » et « intuitif » du conducteur. En effet, comme a pu le démontrer l'étude de Jamson *et al*. (2012), la plupart des conducteurs en viennent à désactiver l'aide au dépassement, par frustration, car ils jugent les feedbacks annoncés comme étant soit trop prudents par rapport à la situation réelle du dépassement soit trop risqués.

Contrairement aux systèmes d'aide au dépassement actuels, nous proposons un système capable de détecter la personnalité et les capacités d'action du conducteur par simple analyse des dynamiques d'accélération. En effet, comme nous l'avons montré dans notre dernière expérimentation, les profils dynamiques de populations définies comme preneuses de risques ou prudentes sont caractérisables. Par ailleurs, nous estimons qu'il n'est pas utile de surcharger l'algorithme du modèle d'aide au dépassement par des propriétés spatio-temporelles secondaires

(e.g., géométrie de la route, du véhicule) mais au contraire d'intégrer des propriétés du système agent-environnement (e.g., *MSA*). Comme nous avons pu le démontrer à travers les quatre études présentées précédemment, les conducteurs sont fortement sensibles aux variations de telles propriétés. On pourrait ainsi imaginer une période de calibration de l'ADAS à la dynamique du conducteur avant toute utilisation réelle. Une fois les capacités d'action modélisées par le système d'aide au dépassement, le conducteur pourrait valider le profil de conduite dressé. Cette proposition d'élaboration d'une nouvelle ADAS participe d'une vision selon laquelle c'est à l'appareillage présent dans le véhicule conduit de s'adapter au profil du conducteur et non l'inverse.

V. Bibliographie

40 millions d'automobilistes. (n.d.). Synthèse des travaux d'analyse des accidents mortels de l'année 2011. Retrieved from http://www.40millionsdautomobilistes.com/publications-nos-enquetes

Alicandri, E. (1994). HYSIM: the next best thing to being on the road. *Public Roads*, *57*(3). Retrieved from http://trid.trb.org/view.aspx?id=1169984

Arvind Raj, V. P., Dinesh, V., Manish, P., & Sasikala, G. (2013). Active Overtaking Assistant. Presented at the International Conference on Electronics and Communication Engineering.

Association Prévention Routière (APR). (n.d.). Causes des accidents de la route - Association Prévention Routière (APR). Retrieved from http://www.preventionroutiere.asso.fr/Nos-publications/Statistiques-d-accidents/Principaux-facteurs-d-accidents

Barańska, M. (2010). Computer-Aided Car Over-Taking System. *Intelligent Information and Database Systems*, 302–307.

Bardy, B. G., & Mantel, B. (2006). Ask not what's inside your head, but what your head is inside of (Mace, 1977). Retrieved January 27, 2011, from

Bar-Gera, H., & Shinar, D. (2005). The tendency of drivers to pass other vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *8*(6), 429–439.

Basilio, N., Morice, A. H., Marti, G., & Montagne, G. (In press). High- and Low-Order Overtaking-Ability Affordances: Drivers Rely on the Maximum Velocity and Acceleration of Their Cars to Perform Overtaking Maneuvers. *Human Factors*. http://doi.org/10.1177/0018720815583581

Bastin, J., Fajen, B. R., & Montagne, G. (2010). Controlling speed and direction during interception: an affordance-based approach. *Experimental Brain Research*, *201*(4), 763–780. http://doi.org/10.1007/s00221-009-2092-y

Baumberger, B., Flückiger, M., Paquette, M., Bergeron, J., & Delorme, A. (2005). Perception of relative distance in a driving simulator1,2. *Japanese Psychological Research*, *47*(3), 230–237. http://doi.org/10.1111/j.1468-5884.2005.00292.x

Benedetto, A., Benedetto, F., De Blasiis, M. R., & Giunta, G. (2004). Reliability of Radar Inspection for Detection of Pavement Damage. *Road Materials and Pavement Design*, *5*(1), 93–110. http://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689964

Björkman, M. (1963). AN EXPLORATORY STUDY OF PREDICTIVE JUDGMENTS IN A TRAFFIC SITUATION. *Scandinavian Journal of Psychology*, *4*(1), 65–76. http://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1963.tb01309.x

Bootsma, R. J., Bakker, F. C., van Snippenberg, F. E. J., & Tdlohreg, C. W. (1992). The Effects of Anxiety on Perceiving the Reachability of Passing Objects. *Ecological Psychology*, *4*(1), 1–16. http://doi.org/10.1080/10407413.1992.10530790

Bouvier, P. (2009). *La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur*. Paris Est. Retrieved from http://www.theses.fr/2009PEST1035

Brown, R. L., & Hummer, J. E. (2000). Determining the best method for measuring no-passing zones. *Design Speed, Operating Speed, and Sight Distance Issues*, (1701), 61–67.

Buřič, L., & Janovský, V. (2007). The Overtaking in a Class of Traffic Models: A Filippov System Formulation. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 936, pp. 97–100). AIP Publishing. http://doi.org/10.1063/1.2790276

Buřič, L., & Janovský, V. (2009). The traffic problem: Modeling of the overtaking. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, *32*(18), 2319–2338. http://doi.org/10.1002/mma.1134

Buřič, L., & Janovský, V. (2013). A traffic flow model with overtaking as a Filippov system. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, *254*, 55–64. http://doi.org/10.1016/j.cam.2013.03.033

Cantin, V., Lavalliere, M., Simoneau, M., & Teasdale, N. (2009). Mental workload when driving in a simulator: Effects of age and driving complexity. *Accident Analysis and Prevention*, *41*(4), 763–771. http://doi.org/10.1016/j.aap.2009.03.019

Carello, C., Grosofsky, A., Reichel, F. D., Solomon, H. Y., & Turvey, M. T. (1989). Visually perceiving what is reachable. *Ecological Psychology*, *1*(1), 27–54.

Castanier, C., Scanff, C. L., & Woodman, T. (2010). Who Takes Risks in High-Risk Sports? A Typological Personality Approach. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *81*(4), 478–484.

Cesari, P., Formenti, F., & Olivato, P. (2003). A common perceptual parameter for stair climbing for children, young and old adults. *Human Movement Science*, *22*(1), 111–124. http://doi.org/10.1016/S0167-9457(03)00003-4

Cestac, J., Paran, F., & Delhomme, P. (2011). Young drivers' sensation seeking, subjective norms, and perceived behavioral control and their roles in predicting speeding intention: How risk-taking motivations evolve with gender and driving experience. *Safety Science*, *49*(3), 424–432. http://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.10.007

Charlton, S. G. (2007). Delineation effects in overtaking lane design. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *10*(2), 153–163. http://doi.org/10.1016/j.trf.2006.09.003

Chemero, A. (2003). An outline of a theory of affordances. *Ecological Psychology*, *15*(2), 181–195.

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*(6), 1535–1552. http://doi.org/10.1037/a0020560

Clarke, D. D., Ward, P. J., & Jones, J. (1998). Overtaking road-accidents: differences in manoeuvre as a function of driver age. *Accident Analysis & Prevention*, *30*(4), 455–467. http://doi.org/10.1016/S0001-4575(97)00105-X

Clarke, D. D., Ward, P. J., & Jones, J. (1999). Processes and countermeasures in overtaking road accidents. *Ergonomics*, *42*(6), 846–867. http://doi.org/10.1080/001401399185333

Cole, W. G., Chan, G. L. Y., Vereijken, B., & Adolph, K. E. (2013). Perceiving affordances for different motor skills. *Experimental Brain Research*, *225*(3), 309–319. http://doi.org/10.1007/s00221-012-3328-9

Cornus, S. (1998, January 1). *Un couplage perception-mouvement dans un enjambement d'obstacle*. Université Aix-Marseille 2. Retrieved from http://www.theses.fr/1998AIX22066

Cornus, S., Montagne, G., & Laurent, M. (1999). Perception of a stepping-across affordance. *Ecological Psychology*, *11*(4), 249–267. http://doi.org/10.1207/s15326969eco1104_1

CRTRV. (2004). Le comité de rédaction du traité de la réalité virtuelle. Dossier de présentation du TRV3.

Darras, B., & Belkhamsa, S. (2008). Étude comparée des concepts d'affordance, d'énaction et d'habitude d'action.

Dehaene, S. (2012). Chaire Psychologie cognitive expérimentale. Retrieved August 6, 2014, from http://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/course-2012-01-10-09h30.htm

Delhomme, P. (2002). *Croyances des jeunes automobilistes en matière de vitesse* (Rapport final No. Convention DSCR-INRETS N°00/010/T-étude No. 7).

Delhomme, P., Chaurand, N., & Paran, F. (2012). Personality predictors of speeding in young drivers: Anger vs. sensation seeking. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *15*(6), 654–666. http://doi.org/10.1016/j.trf.2012.06.006

Delhomme, P., Verlhiac, J. F., & Martha, C. (2009). Are drivers' comparative risk judgments about speeding realistic? *Journal of Safety Research*, *40*(5), 333–339.

De Rugy, A., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2001). Spatially constrained locomotion under informational conflict. *Behavioural Brain Research*, *123*(1), 11–15.

Desmond, P. A., & Matthews, G. (1997). Implications of task-induced fatigue effects for in-vehicle countermeasures to driver fatigue. *Accident Analysis & Prevention*, *29*(4), 515–523.

Dicks, M., Davids, K., & Button, C. (2010). Individual differences in the visual control of intercepting a penalty kick in association football. *Human Movement Science*, *29*(3), 401–411. http://doi.org/10.1016/j.humov.2010.02.008

Ellingrod, V. L., Perry, P. J., Yates, W. R., Maclndoe, J. H., Watson, G., Arndt, S., & Holman, T. L. (1997). The effects of anabolic steroids on driving performance as assessed by the Iowa Driver Simulator. *The American Journal of Drug and Alcohol Abuse*, *23*(4), 623–636.

Eysenck, H. J. (1990). Genetic and Environmental Contributions to Individual Differences: The Three Major Dimensions of Personality. *Journal of Personality*, *58*(1), 245–261. http://doi.org/10.1111/j.1467-6494.1990.tb00915.x

Eysenck, H. J. (1994). Creativity and personality: Word association, origence, and psychoticism. *Creativity Research Journal*, *7*(2), 209–216.

Eysenck, H. J., & Eysenck, M. W. (1985). *Personality and Individual Differences: A Natural Science Approach*. Springer Dordrecht.

Fajen, B. R. (2005a). Calibration, information, and control strategies for braking to avoid a collision. *Journal of Experimental Psychology*, *31*(3), 480–501.

Fajen, B. R. (2005b). Perceiving possibilities for action: On the necessity of calibration and perceptual learning for the visual guidance of action. *Perception-London*, *34*(6), 717–740.

Fajen, B. R. (2005c). The scaling of information to action in visually guided braking. *Journal of Experimental Psychology*, *31*(5), 1107–1123.

Fajen, B. R. (2007a). Affordance-based control of visually guided action. *Ecological Psychology*, *19*(4), 383–410.

Fajen, B. R. (2007b). Rapid recalibration based on optic flow in visually guided action. *Experimental Brain Research*, *183*(1), 61–74. http://doi.org/10.1007/s00221-007-1021-1

Fajen, B. R. (2008a). Learning novel mappings from optic flow to the control of action. *Journal of Vision*, *8*(11). http://doi.org/10.1167/8.11.12

Fajen, B. R. (2008b). Perceptual learning and the visual control of braking. *Perception & Psychophysics*, *70*(6), 1117.

Fajen, B. R., & Devaney, M. C. (2006). Learning to control collisions: The role of perceptual attunement and action boundaries. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance*, *32*(2), 300–313. http://doi.org/10.1037/0096-1523.32.2.300

Fajen, B. R., Diaz, G., & Cramer, C. (2011). Reconsidering the role of movement in perceiving action-scaled affordances. *Human Movement Science*, *30*(3), 504–533. http://doi.org/10.1016/j.humov.2010.07.016

Fajen, B. R., & Matthis, J. S. (2011). Direct perception of action-scaled affordances: the shrinking gap problem. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *37*(5), 1442–1457. http://doi.org/10.1037/a0023510

Fajen, B. R., & Matthis, J. S. (2013). Visual and Non-Visual Contributions to the Perception of Object Motion during Self-Motion. *PloS One*, *8*(2). http://doi.org/10.1371/journal.pone.0055446

Fajen, B. R., Riley, M. A., & Turvey, M. T. (2009). Information, affordances, and the control of action in sport. *International Journal of Sport Psychology*, *40*(1), 79–107.

Farah, H. (2011). Age and Gender Differences in Overtaking Maneuvers on Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record*, (2248), 30–36. http://doi.org/10.3141/2248-04

Farah, H. (2013). Modeling drivers' passing duration and distance in a virtual environment. *IATSS Research*, *37*(1), 61–67. http://doi.org/10.1016/j.iatssr.2013.03.001

Farah, H., Bekhor, S., & Polus, A. (2009). Risk evaluation by modeling of passing behavior on two-lane rural highways RID E-1741-2011. *Accident Analysis and Prevention*, *41*(4), 887–894. http://doi.org/10.1016/j.aap.2009.05.006

Farah, H., & Toledo, T. (2010). Passing behavior on two-lane highways. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *13*(6), 355–364. http://doi.org/10.1016/j.trf.2010.07.003

Feij, J. A., & Kuiper, C. M. (1984). *Adolescent Temperament Lijst (ATL)[Adolescent Temperament Questionnaire]*. Swets and Zeitlinger, Lisse.

Flach. (2011). *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine and Psychology*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis.

Flach, J. M., Jagacinski, R. J., Smith, M. R. H., McKenna, B., Fisher, D. L., Rizzo, M., … Lee, J. D. (2011). Coupling perception, action, intention, and value: A control theoretic approach to driving performance. *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine and Psychology*.

Fodor, J. A., & Pylyshyn, Z. W. (1981). How Direct is Visual Perception? Some Reflections on Gibson's "Ecological Approach." *Cognition*, *9*(2), 139–96.

Franchak, J. M., Celano, E. C., & Adolph, K. E. (2012). Perception of passage through openings depends on the size of the body in motion. *Experimental Brain Research*, *223*(2), 301–310. http://doi.org/10.1007/s00221-012-3261-y

Franchak, J. M., van der Zalm, D. J., & Adolph, K. E. (2010). Learning by doing: action performance facilitates affordance perception. *Vision Research*, *50*(24), 2758–2765. http://doi.org/10.1016/j.visres.2010.09.019

Fraser, D. A., Hawken, R. E., & Warnes, A. M. (1994). Effects of extra signals on drivers' distance keeping-a simulation study. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, *43*(4), 1118–1124.

Friston, K. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, *11*(2), 127–138. http://doi.org/10.1038/nrn2787

Fuchs, P. (1996). *Les interfaces de la réalité virtuelle*. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.

Gibson, E. J., & Walk, R. D. (1960). The visual cliff. *Scientific American*, *202*, 80–92.

Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Waveland Press.

Gibson, J. J. (1977). *The theory of affordances. Perceiving, acting, and knowing: toward an ecological psychology. R. Shaw and J. Bransford*. Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates.

Gibson, J. J. (1986). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Routledge.

Glennon, J. C. (1988). *New and improved model of passing sight distance on two-lane highways*. Retrieved from http://trid.trb.org/view.aspx?id=302154

Glenn, P. (2013). *CarTest 2000, Automobile Acceleration Simulation Software, CarTest Software*. Retrieved from http://www.cartestsoftware.com

Goldberg, L. R. (1990). An alternative" description of personality": the big-five factor structure. *Journal of Personality and Social Psychology*, *59*(6), 1216.

Gordon, D. A., & Mast, T. M. (1970). Drivers' Judgments in Overtaking and Passing. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *12*(3), 341–346. http://doi.org/10.1177/001872087001200310

Gray, R., & Regan, D. (2000). Risky driving behavior: A consequence of motion adaptation for visually guided motor action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *26*(6), 1721–1732. http://doi.org/10.1037/0096-1523.26.6.1721

Gray, R., & Regan, D. M. (2005). Perceptual processes used by drivers during overtaking in a driving simulator. *Human Factors*, *47*(2), 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. http://doi.org/10.1037/a0029716

Groeger, J. A. (1999). Expectancy and control: Perceptual and cognitive aspects of the driving task. In *Human performance and ergonomics* (pp. 243–264). San Diego, CA, US: Academic Press.

Groeger, J. A., & Clegg, B. A. (1994). Why isn't driver training contributing more to road safety? Presented at the Behavioural Research In Road Safety Iv. Proceedings of a seminar held 6-7 September 1993, Brunel University. (Trl Published Article Pa 3035/94). Retrieved from http://trid.trb.org/view.aspx?id=415418

Hassan, Y., Easa, S. M., & El Halim, A. O. (1996). Passing sight distance on two-lane highways: Review and revision. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *30*(6), 453–467.

Hatfield, J., & Fernandes, R. (2009). The role of risk-propensity in the risky driving of younger drivers. *Accident Analysis & Prevention*, *41*(1), 25–35.

Hegeman, G. (2004). *Overtaking frequency and advanced driver assistance systems*. New York: Ieee.

Hegeman, G. (2008). *Assisted overtaking: an assessment of overtaking on two-lane rural roads*. TRAIL Research School. Retrieved from http://www.ulb.tu-darmstadt.de/tocs/198440022.pdf

Hegeman, G., Brookhuis, K. A., & Hoogendoorn, S. P. (2005). Observing Overtaking Manoeuvres to Design an Overtaking Assistance System. Presented at the 12th World

Congress on Intelligent Transport Systems. Retrieved from http://trid.trb.org/view.aspx?id=771947

Hegeman, G., Brookhuis, K., Hoogendoorn, S., & others. (2005). Opportunities of advanced driver assistance systems towards overtaking. *EJTIR*, *5*(4), 281–296.

Hegeman, G., Tapani, A., & Hoogendoorn, S. (2009). Overtaking assistant assessment using traffic simulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *17*(6), 617–630.

Hegeman, G., van der Horst, R., Brookhuis, K. A., & Hoogendoorn, S. P. (2007). Functioning and acceptance of overtaking assistant design tested in driving simulator experiment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2018*(-1), 45–52.

Hoogendoorn, S. P., & Minderhoud, M. M. (2001). ADAS impact assessment by micro-simulation. *European Journal of Transport and Infrastructure Research EJTIR*, *1*(3), 255–275.

Huang, H., Ellis, T. D., Wagenaar, R. C., & Fetters, L. (2013). The Impact of Body-Scaled Information on Reaching. *Physical Therapy*, *93*(1), 41–49. http://doi.org/10.2522/ptj.20110467

Ishak, S., Adolph, K. E., & Lin, G. C. (2008). Perceiving affordances for fitting through apertures. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *34*(6), 1501–1514. http://doi.org/10.1037/a0011393

Ishak, S., Franchak, J. M., & Adolph, K. E. (2014). Perception-action development from infants to adults: perceiving affordances for reaching through openings. *Journal of Experimental Child Psychology*, *117*, 92–105. http://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.09.003

Isler, R. B., Starkey, N. J., & Sheppard, P. (2011). Effects of higher-order driving skill training on young, inexperienced drivers' on-road driving performance. *Accident Analysis and Prevention*, *43*(5), 1818–1827. http://doi.org/10.1016/j.aap.2011.04.017

Jacobs, D. M., Michaels, C. F., & Runeson, S. (2000). Learning to perceive the relative mass of colliding balls: the effects of ratio scaling and feedback. *Perception & Psychophysics*, *62*(7), 1332–1340.

Jamson, S., Chorlton, K., & Carsten, O. (2012). Could Intelligent Speed Adaptation make overtaking unsafe? *Accident Analysis and Prevention*, *48*, 29–36. http://doi.org/10.1016/j.aap.2010.11.011

Jenkins, J. M., & Rilett, L. R. (2004). Application of distributed traffic simulation for passing behavior study. In *Driver and Vehicle Simulation, Human Performance, and Information Systems for Highways; Railroad Safety; and Visualization in Transportation* (pp. 11–18). Washington: Transportation Research Board Natl Research Council.

Jenkins, J. M., & Rilett, L. R. (2005). Classifying passing maneuvers: a behavioral approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1937*(-1), 14–21.

Jonah, B. A. (1997). Sensation seeking and risky driving: a review and synthesis of the literature. *Accident Analysis & Prevention*, *29*(5), 651–665. http://doi.org/10.1016/S0001-4575(97)00017-1

Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, *3*(3), 203–220.

Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M., & Helbing, D. (2008). Adaptive cruise control design for active congestion avoidance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *16*(6), 668–683.

Kinsella-Shaw, J. M., Shaw, B., & Turvey, M. T. (1992). Perceiving "Walk-on-able" Slopes. *Ecological Psychology*, *4*(4), 223–239. http://doi.org/10.1207/s15326969eco0404_2

Konczak, J., Meeuwsen, H. J., & Cress, M. E. (1992). Changing affordances in stair climbing: The perception of maximum climbability in young and older adults. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *18*(3), 691.

Lee, J. D., & Strayer, D. L. (2004). Preface to the Special Section on Driver Distraction. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *46*(4), 583–586. http://doi.org/10.1518/hfes.46.4.583.56811

Lee, S. E., Olsen, E. C. B., & Wierwille, W. W. (2004). A Comprehensive Examination Of Naturalistic Lane-Changes. Retrieved from http://trid.trb.org/view.aspx?id=743236

Lemercier, C., & Cellier, J.-M. (2008). Les défauts de l'attention en conduite automobile: inattention, distraction et interférence. *Le Travail Humain*, *71*(3), 271–296.

Lewin, K. (1936). *Principles of Topological Psychology*. University Microfilms, A Xerox Company.

Llorca, C., & García, A. (2011). Evaluation of Passing Process on Two-Lane Rural Highways in Spain with New Methodology Based on Video Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2262*(-1), 42–51. http://doi.org/10.3141/2262-05

Llorca, C., Garcia, A., Moreno, A. T., & Maria Perez-Zuriaga, A. (2013). Influence of age, gender and delay on overtaking dynamics. *Iet Intelligent Transport Systems*, *7*(2), 174–181. http://doi.org/10.1049/iet-its.2012.0147

Llorca, C., Garcia, A., Zuriaga, P., Maria, A., & Moreno, A. T. (2012). New Experimental Approach for Passing Gap Acceptance. Presented at the Transportation Research Board 91st Annual Meeting. Retrieved from http://trid.trb.org/view.aspx?id=1129344

Loewenau, D. J., Gresser, K., Wisselmann, D., Richter, W., Rabel, D., & Durekovic, S. (2006). Dynamic Pass Prediction — A New Driver Assistance System for Superior and Safe Overtaking. In D. J. Valldorf & D. W. Gessner (Eds.), *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2006* (pp. 67–77). Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-33410-6_7

Loomis, J. M., Blascovich, J. J., & Beall, A. C. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers: A Journal of the Psychonomic Society, Inc*, *31*(4), 557–564.

Luyat, M. (2009). *La perception*. Paris: Dunod.

Luyat, M., & Regia-Corte, T. (2009). The affordances: from James Jerome Gibson to the recent formal models of the concept. *Annee Psychologique*, *109*(2), 297–332.

Mantel, B. (2009). *Information entre les sens et mouvement exploratoire pour percevoir si un objet est atteignable*. Montpellier 1. Retrieved from http://www.theses.fr/2009MON14003

Mantel, B., Bardy, B. G., & Stoffregen, T. A. (2007). Critical boudaries and median values in affordance perception. In *Studies in Perception and Action IX* (S. Cummin-Sebree, M. Riley, & K. Shockley, pp. 222–224). New York/London: Lawrence Erlbaum Associates.

Maraj, B. K. V. (2003). Perceptual judgments for stair climbing as a function of pitch angle. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *74*(3), 248–256.

Mark, L. S. (1987). Eyeheight-scaled information about affordances: a study of sitting and stair climbing. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *13*(3), 361–370.

Mark, L. S., Nemeth, K., Gardner, D., Dainoff, M. J., Paasche, J., Duffy, M., & Grandt, K. (1997). Postural dynamics and the preferred critical boundary for visually guided reaching. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance*, *23*(5), 1365–1379. http://doi.org/10.1037/0096-1523.23.5.1365

Mark, L. S., & Vogele, D. (1987). A Biodynamic Basis for Perceived Categories of Action - a Study of Sitting and Stair Climbing. *Journal of Motor Behavior*, *19*(3), 367–384.

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*, *8*, 1026. http://doi.org/10.3389/fnhum.2014.01026

Matthews, G., Dorn, L., Hoyes, T. W., Davies, D. R., Glendon, A. I., & Taylor, R. G. (1998). Driver Stress and Performance on a Driving Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *40*(1), 136–149. http://doi.org/10.1518/001872098779480569

McKenna, B. P. (2004). *Role of Optical Angle and Expansion Rate in a Braking Action*. Wright State University.

McKnight, A. J., & Adams, B. B. (1970). Driver Education Task Analysis. Vol I. Task Descriptions. Final Report. Retrieved from http://trid.trb.org/view.aspx?id=114083

Meeuwsen, H. J. (1991). Variables affecting perceptual boundaries in bipedal stair climbing. *Perceptual and Motor Skills*, *72*(2), 539–543.

Merleau-Ponty, M. (1976). *Phénoménologie de la perception*. [Paris]: Gallimard.

Mestre, D. (2006). Interactions entre réalité virtuelle et sciences du comportement. In *Le traité de la réalité virtuelle : L'homme et l'environnement virtuel* (Vol. 1, pp. 365–380). Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.

Michaels, C. F., & de Vries, M. M. (1998). Higher order and lower order variables in the visual perception of relative pulling force. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *24*(2), 526–546.

Milanes, V., Llorca, D. F., Villagra, J., Perez, J., Fernandez, C., Parra, I., … Sotelo, M. A. (2012). Intelligent automatic overtaking system using vision for vehicle detection. *Expert Systems with Applications*, *39*(3), 3362–3373. http://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.024

Milanés, V., Naranjo, J. E., González, C., Alonso, J., & de Pedro, T. (2008). Autonomous vehicle based in cooperative GPS and inertial systems. *Robotica*, *26*(05), 627–633. http://doi.org/10.1017/S0263574708004232

Mohaymany, A. S., Kashani, A. T., & Ranjbari, A. (2010). Identifying Driver Characteristics Influencing Overtaking Crashes. *Traffic Injury Prevention*, *11*(4), 411–416. http://doi.org/10.1080/15389588.2010.485283

Morice, A. H., Diaz, G. J., Fajen, B. R., Basilio, N., & Montagne, G. (2015). An affordance-based approach to visually guided overtaking. *Ecological Psychology*.

Naranjo, J. E., Gonzalez, C., Garcia, R., & de Pedro, T. (2008). Lane-Change Fuzzy Control in Autonomous Vehicles for the Overtaking Maneuver. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *9*(3), 438–450. http://doi.org/10.1109/TITS.2008.922880

National Interministerial Observatory for Road Safety. (2011). Retrieved from http://www.securite-routiere.gouv.fr/la-securite-routiere/l-observatoire-national-interministeriel-de-la-securite-routiere/bilans-annuels/bilans-annuels-de-la-securite-routiere-en-france

Oudejans, R. R., Michaels, C. F., & Bakker, F. C. (1997). The effects of baseball experience on movement initiation in catching fly balls. *Journal of Sports Sciences*, *15*(6), 587–595. http://doi.org/10.1080/026404197367029

Oudejans, R. R., Michaels, C. F., Bakker, F. C., & Dolné, M. A. (1996). The relevance of action in perceiving affordances: perception of catchableness of fly balls. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *22*(4), 879–891.

Oudejans, R. R., Michaels, C. F., van Dort, B., & Frissen, E. J. . (1996). To cross or not to cross: The effect of locomotion on street-crossing behavior. *Ecological Psychology*, *8*(3), 259–267.

Özkan, T., & Lajunen, T. (2006). What causes the differences in driving between young men and women? The effects of gender roles and sex on young drivers' driving behaviour and self-assessment of skills. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *9*(4), 269–277. http://doi.org/10.1016/j.trf.2006.01.005

Paterson, G., van der Kamp, J., Bressan, E., & Savelsbergh, G. (2013). The effects of perception-action coupling on perceptual decision-making in a self-paced far aiming task.

International Journal of Sport Psychology, *44*(3), 179–196. http://doi.org/10.7352/IJSP2013.44.179

Peng, Y.-F. (2010). Adaptive Intelligent Backstepping Longitudinal Control of Vehicleplatoons Using Output Recurrent Cerebellar Model Articulation Controller. *Expert Syst. Appl.*, *37*(3), 2016–2027. http://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.06.055

Pepping, G. J., & Li, F. X. (2000). Changing action capabilities and the perception of affordances. *Journal of Human Movement Studies*, *39*(2), 115.

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. http://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2007.00515.x

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. http://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.07.005

Pollatschek, M. A., & Polus, A. (2005). Modelling Impatience of Driver in Passing Manuevers. Presented at the Transportation and Traffic Theory. Flow, Dynamics and Human Interaction. 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. Retrieved from http://144.171.11.39/view.aspx?id=758854

Polus, A., Livneh, M., & Frischer, B. (2000). Evaluation of the passing process on two-lane rural highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1701*(-1), 53–60.

Proffitt, D. R. (2006). Embodied Perception and the Economy of Action. *Perspectives on Psychological Science*, *1*(2), 110–122. http://doi.org/10.1111/j.1745-6916.2006.00008.x

Proffitt, D. R., Bhalla, M., Gossweiler, R., & Midgett, J. (1995). Perceiving geographical slant. *Psychonomic Bulletin & Review*, *2*(4), 409–428. http://doi.org/10.3758/BF03210980

Proffitt, D. R., Stefanucci, J., Banton, T., & Epstein, W. (2003). The role of effort in perceiving distance. *Psychological Science*, *14*(2), 106–112.

Ramenzoni, V. C., Riley, M. A., Davis, T., Shockley, K., & Armstrong, R. (2008). Tuning in to another person's action capabilities: perceiving maximal jumping-reach height from walking kinematics. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *34*(4), 919–928. http://doi.org/10.1037/0096-1523.34.4.919

Ramenzoni, V. C., Riley, M. A., Shockley, K., & Davis, T. (2008a). An information-based approach to action understanding. *Cognition*, *106*(2), 1059–1070. http://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.04.008

Ramenzoni, V. C., Riley, M. A., Shockley, K., & Davis, T. (2008b). Carrying the height of the world on your ankles: encumbering observers reduces estimates of how high an actor can jump. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, *61*(10), 1487–1495. http://doi.org/10.1080/17470210802100073

Redelmeier, D. A., & Tibshirani, R. J. (2000). Are Those other Drivers Really Going Faster? *CHANCE*, *13*(3), 8–14. http://doi.org/10.1080/09332480.2000.10542215

Regia-Corte, T., & Wagman, J. B. (2008). Perception of affordances for standing on an inclined surface depends on height of center of mass. *Experimental Brain Research*, *191*(1), 25–35. http://doi.org/10.1007/s00221-008-1492-8

Riener, C. R., Stefanucci, J. K., Proffitt, D., & Clore, G. (2003). An effect of mood on perceiving spatial layout. *Journal of Vision*, *3*(9), 227–227. http://doi.org/10.1167/3.9.227

Riener, C. R., Stefanucci, J. K., Proffitt, D. R., & Clore, G. (2011). An effect of mood on the perception of geographical slant. *Cognition & Emotion*, *25*(1), 174–182. http://doi.org/10.1080/02699931003738026

Road Safety Report 2013 Rural Roads - DEKRA. (2013). Retrieved from http://www.dekra.de/en/verkehrssicherheitsreport-2013

Ruiz, J. A., Gil, J. J., Naranjo, J. E., Suárez, J. I., & Vinagre, B. (2007). Cooperative Maneuver Study Between Autonomous Cars: Overtaking. In R. Moreno Díaz, F. Pichler, & A. Quesada Arencibia (Eds.), *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2007* (Vol. 4739, pp. 1151–1158). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-75867-9_144

Sato, Y., & Yoshimoto, T. (2008). Strategies used in stepping onto an obstacle step during walking and perceived properties of body. *Japanese Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, *57*(1), 111–117.

Schaëfer, A. (2009). Les pièges du volant. *Cerveau & Psycho*, (36). Retrieved from http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/article-les-pieges-du-volant-23673.php

Sécurité Routière. (n.d.). Les bilans annuels de la sécurité routière en France. Retrieved from http://www.securite-routiere.gouv.fr/la-securite-routiere/l-observatoire-national-

interministeriel-de-la-securite-routiere/bilans-annuels/les-bilans-annuels-de-la-securite-routiere-en-france

Shinar, D. (1998). Aggressive driving: the contribution of the drivers and the situation. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *1*(2), 137–160. http://doi.org/10.1016/S1369-8478(99)00002-9

Shinar, D., & Compton, R. (2004). Aggressive driving: an observational study of driver, vehicle, and situational variables. *Accident; Analysis and Prevention*, *36*(3), 429–437. http://doi.org/10.1016/S0001-4575(03)00037-X

Silver, C. A., & Farber, E. (1967). KNOWLEDGE OF ONCOMING CAR SPEED AS A DETERMINER OF DRIVER'S PASSING BEHAVIOR. *Highway Research Record*, (195). Retrieved from http://pubsindex.trb.org/view.aspx?id=115528

Solomon, H. Y., & Turvey, M. T. (1988). Haptically perceiving the distances reachable with hand-held objects. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *14*(3), 404–427.

Solomon, H. Y., Turvey, M. T., & Burton, G. (1989). Perceiving extents of rods by wielding: haptic diagonalization and decomposition of the inertia tensor. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *15*(1), 58–68.

Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L., & Lushene, R. E. (1970). Manual for the State-Trait Anxiety Inventory. Retrieved from http://ubir.buffalo.edu/xmlui/handle/10477/2895

Stanton, N. A., & Pinto, M. (2001). Will radar-based vision enhancement make driving safer? An experimental study of a hypothetical system on a driving simulator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, *215*(9), 959–967. http://doi.org/10.1243/0954407011528527

Stefanucci, J. K., & Geuss, M. N. (2009). Big people, little world: the body influences size perception. *Perception*, *38*(12), 1782–1795.

Stefanucci, J. K., & Geuss, M. N. (2010). Duck! Scaling the height of a horizontal barrier to body height. *Attention Perception & Psychophysics*, *72*(5), 1338–1349. http://doi.org/10.3758/APP.72.5.1338

Stephens, A. N., & Groeger, J. A. (2011). Anger-congruent behaviour transfers across driving situations. *Cognition & Emotion*, *25*(8), 1423–1438. http://doi.org/10.1080/02699931.2010.551184

Stoeckel, R. B., May, M. A., & Kirby, R. S. (1936). *Sense and safety on the road*. D. Appleton-Century company, incorporated.

Stoffregen, T. A. (2000). Affordances and Events. *Ecological Psychology*, *12*(1), 1–28. http://doi.org/10.1207/S15326969ECO1201_1

Stoffregen, T. A. (2003). Affordances as Properties of the Animal-Environment System. *Ecological Psychology*, *15*(2), 115–134. http://doi.org/10.1207/S15326969ECO1502_2

Stoffregen, T. A., & Bardy, B. G. (2004). Theory testing and the global array. *Behavioral and Brain Sciences*, *27*(06), 892 – 900. http://doi.org/10.1017/S0140525X04270200

Stoffregen, T. A., Bardy, B. G., & others. (2001). On specification and the senses. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*(2), 195–213.

Stoffregen, T. A., Gorday, K. M., Sheng, Y.-Y., & Flynn, S. B. (1999). Perceiving affordances for another person's actions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*(1), 120–136. http://doi.org/10.1037/0096-1523.25.1.120

Tapani, A. (2005). Versatile model for simulation of rural road traffic. *Transportation Research Record*, (1934), 169–178.

Tarr, M., & Warren, W. H. (2002). Virtual reality in behavioral neuroscience and beyond. *Nature Neuroscience*, *5*, 1089–1092. http://doi.org/10.1038/nn948

Temprado, & Montagne. (2001). *Les coordinations perceptivo-motrices*. Armand Colin.

Te Velde, A. F., van der Kamp, J., Barela, J. A., & Savelsbergh, G. J. P. (2005). Visual timing and adaptive behavior in a road-crossing simulation study. *Accident; Analysis and Prevention*, *37*(3), 399–406. http://doi.org/10.1016/j.aap.2004.12.002

The Netherlands Institute for Road Safety Research. (n.d.). Retrieved from http://www.swov.nl/UK/Research/Cijfers/Cijfers_ongevallen-UK.htm

The Royal Society for the Prevention of Accidents – United Kingdom. (2009). Retrieved from http://www.rospa.com/roadsafety/adviceandinformation/driving/

Toledo, T., & Farah, H. (2011). Alternative Definitions of Passing Critical Gaps. *Transportation Research Record*, (2260), 76–82. http://doi.org/10.3141/2260-09

Turvey, M., Shaw, R., Reed, E., & Mace, W. (1981). Ecological Laws of Perceiving and Acting - Reply. *Cognition*, *9*(3), 237–304. http://doi.org/10.1016/0010-0277(81)90002-0

Turvey, M. T. (1992). Affordances and prospective control: An outline of the ontology. *Ecological Psychology*, *4*(3), 173–187.

Ulleberg, P., & Rundmo, T. (2002). Risk–taking attitudes among young drivers: The psychometric qualities and dimensionality of an instrument to measure young drivers' risk–taking attitudes. *Scandinavian Journal of Psychology*, *43*(3), 227–237.

Ulleberg, P., & Rundmo, T. (2003). Personality, attitudes and risk perception as predictors of risky driving behaviour among young drivers. *Safety Science*, *41*(5), 427–443. http://doi.org/10.1016/S0925-7535(01)00077-7

Underwood, G., Crundall, D., & Chapman, P. (2011). Driving simulator validation with hazard perception. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *14*(6), 435–446. http://doi.org/10.1016/j.trf.2011.04.008

Vanderbilt, T. (2009). *Traffic: why we drive the way we do (and what it says about us)*. New York: Vintage Books.

Van Der Horst, A., & Bakker, P. J. (1993). Lane keeping behaviour at profiled road markings: video observations in the before-situation on the motorway A50, (IZF 1993 C-35). Retrieved from http://trid.trb.org/view.aspx?id=573613

Van Winsum, W., & Brouwer, W. (1997). Time headway in car following and operational performance during unexpected braking. *Perceptual and Motor Skills*, *84*(3c), 1247–1257.

Van Winsum, W., & Godthelp, H. (1996). Speed choice and steering behavior in curve driving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *38*(3), 434–441.

Vlahogianni, E. I. (2013). Modeling duration of overtaking in two lane highways. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *20*, 135–146. http://doi.org/10.1016/j.trf.2013.07.003

Vlahogianni, E. I., & Golias, J. C. (2012). Bayesian modeling of the microscopic traffic characteristics of overtaking in two-lane highways. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *15*(3), 348–357. http://doi.org/10.1016/j.trf.2012.02.002

Vollrath, M., & Torgersen, S. (2002). Who takes health risks? A probe into eight personality types. *Personality and Individual Differences*, *32*(7), 1185–1197.

Vollrath, M., & Torgersen, S. (2008). Personality types and risky health behaviors in Norwegian students. *Scandinavian Journal of Psychology*, *49*(3), 287–292. http://doi.org/10.1111/j.1467-9450.2008.00631.x

Wagman, J. B., & Malek, E. A. (2007). Perception of whether an object can be carried through an aperture depends on anticipated speed. *Experimental Psychology*, *54*(1), 54–61.

Wagman, J. B., & Malek, E. A. (2008). Perception of affordances for walking under a barrier from proximal and distal points of observation. *Ecological Psychology*, *20*(1), 65–83. http://doi.org/10.1080/10407410701766650

Wagman, J. B., & Taylor, K. R. (2005). Perceiving Affordances for Aperture Crossing for the Person-Plus-Object System. *Ecological Psychology*, *17*(2), 105–130. http://doi.org/10.1207/s15326969eco1702_3

Warren, W. H. (1984). Perceiving affordances: Visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *10*(5), 683–703. http://doi.org/10.1037/0096-1523.10.5.683

Warren, W. H. (1988). Chapter 14 Action Modes and Laws of Control for the Visual Guidance Of Action. In Onno G. Meijer and Klaus Roth (Ed.), *Advances in Psychology* (Vol. Volume 50, pp. 339–379). North-Holland. Retrieved from http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166411508625649

Warren, W. H., & Whang, S. (1987). Visual guidance of walking through apertures: Body-scaled information for affordances. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *13*(3), 371–83.

Warshawsky-Livne, L., & Shinar, D. (2002). Effects of uncertainty, transmission type, driver age and gender on brake reaction and movement time. *Journal of Safety Research*, *33*(1), 117–128. http://doi.org/10.1016/S0022-4375(02)00006-3

Watamaniuk, S. N. J., & Heinen, S. J. (2003). Perceptual and oculomotor evidence of limitations on processing accelerating motion. *Journal of Vision*, *3*(11), 698–709. http://doi.org/10:1167/3.11.5

Weast, J. A., Shockley, K., & Riley, M. A. (2011). The influence of athletic experience and kinematic information on skill-relevant affordance perception. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *64*(4), 689–706. http://doi.org/10.1080/17470218.2010.523474

Werkhoven, P., Snippe, H. P., & Toet, A. (1992). Visual processing of optic acceleration. *Vision Research*, *32*(12), 2313–2329.

White, E., & Shockley, K. (2005). Perceiving pass-under-ability while walking and sitting. Presented at the 13th International Conference on Perception and Action, Monterey, CA.

Wiener, E. L. (1981). Complacency: Is the term useful for air safety? In *Proceedings of the 26th Corporate Aviation Safety Seminar* (pp. 116–125). Denver: Flight Safety Foundation, Inc.

Williams, A. F., & Preusser, D. F. (1997). Night driving restrictions for youthful drivers: a literature review and commentary. *Journal of Public Health Policy*, *18*(3), 334–345.

Wilmut, K., & Barnett, A. L. (2010). Locomotor adjustments when navigating through apertures. *Human Movement Science*, *29*(2), 289–298. http://doi.org/10.1016/j.humov.2010.01.001

Wilmut, K., & Barnett, A. L. (2011). Locomotor behaviour of children while navigating through apertures. *Experimental Brain Research*, *210*(2), 185–194. http://doi.org/10.1007/s00221-011-2614-2

Wilson, T., & Best, W. (1982). Driving strategies in overtaking. *Accident Analysis & Prevention*, *14*(3), 179–185.

Withagen, R., & Chemero, A. (2009). Naturalizing Perception Developing the Gibsonian Approach to Perception along Evolutionary Lines. *Theory & Psychology*, *19*(3), 363–389. http://doi.org/10.1177/0959354309104159

Withagen, R., & van Wermeskerken, M. (2010). The Role of Affordances in the Evolutionary Process Reconsidered A Niche Construction Perspective. *Theory & Psychology*, *20*(4), 489–510. http://doi.org/10.1177/0959354310361405

Wraga, M. (1999). The role of eye height in perceiving affordances and object dimensions. *Perception & Psychophysics*, *61*(3), 490–507. http://doi.org/10.3758/BF03211968

Yang, N., & Zhou, M. (2008). Autonomous Overtaking Behavior Simulation for Autonomous Virtual Vehicle in Virtual Traffic Environment. In *Computer Science and Software Engineering, 2008 International Conference on* (Vol. 2, pp. 1150–1153).

Yu, Y., El Kamel, A., & Gong, G. (2014). Modeling and simulation of overtaking behavior involving environment. *Advances in Engineering Software*, *67*, 10–21. http://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.07.004

Zhang, Y., Owen, L. E., & Clark, J. E. (1998). Multiregime approach for microscopic traffic simulation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1644*(1), 103–114.

Zuckerman, M. (1994). *Behavioral Expressions and Biosocial Bases of Sensation Seeking*. Cambridge University Press.

Zuckerman, M., Michael, D., Joireman, J., Teta, P., & Kraft, M. (1993). A comparison of three structural models for personality: The Big Three, the Big Five, and the Alternative Five.

Journal of Personality and Social Psychology, *65*(4), 757–768. http://doi.org/10.1037/0022-3514.65.4.757

VI. Index

affordance-based approach, 125
affordance-based control, 49, 94, 106
affordance-based framework, 104
Amax, iv, v, 61, 62, 64, 66, 69, 72, 73, 80, 82, 88, 89, 92, 93, 94, 95, 100, 103, 110
capacités d'action, 33, 40, 42, 44, 46, 47, 49, 52, 53, 58, 61, 64, 70, 79, 83, 94, 97, 109, 112, 122, 126, 128, 132
cinématiques, 17, 40, 43, 45, 53, 57, 61, 97, 112, 116, 117, 126, 133
cinématiques d'action, iv
Fajen, iv, v, 33, 40, 47, 50, 51, 52, 53, 54, 64, 65, 70, 71, 83, 85, 89, 94, 97, 99, 103, 104, 105, 106, 114, 115
invariant, 114, 119
J. J. Gibson, 2, 4, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 32, 70, 75, 85, 89, 106, 116, 118, 119
mode d'action, iv, v, 12, 18, 25, 32, 34, 36, 37, 38, 41, 47, 49, 50, 52, 69, 71, 72, 73, 81, 82, 85, 90, 94, 97, 104, 106, 109, 113, 122, 125
MSA, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 68, 88, 89, 110, 111
MSV, 57, 58, 59, 61, 62, 89, 99, 124, 125
possibilités d'action, 22, 25, 32, 49, 51, 62, 70, 113
théorie des *affordances*, iv, 70, 71, 85, 89, 99, 100, 105, 106
Warren, iv, 26, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 41, 44, 49, 53, 54, 57, 58, 61, 64, 65, 70, 71, 83, 90, 94, 98, 99, 104, 106, 107

PRISE DE DÉCISION ET POSSIBILITÉS D'ACTION : LA THÉORIE DES *AFFORDANCES* À L'ÉPREUVE DU DÉPASSEMENT AUTOMOBILE

RÉSUMÉ : Le principal objectif de ce travail de thèse est de valider l'hypothèse générale selon laquelle les conducteurs automobiles sélectionnent un mode d'action (i.e., prennent la décision de dépasser ou non) et le régulent (i.e., contrôlent leur dépassement automobile) en percevant des possibilités de dépassement, appelées *affordances.* Ces dernières sont dimensionnées intrinsèquement aux capacités d'action du véhicule conduit (e.g., vitesse ou accélération). Il s'agit ainsi, à partir du formalisme mathématique de l'*affordance* élaboré par Warren (1984) et de la nouvelle conceptualisation de l'*affordance* réalisée par Fajen (2007a), de mettre la théorie des *affordances* à l'épreuve du dépassement automobile à travers trois expérimentations réalisées sur simulateur de conduite.

Dans une première expérimentation, nous avons montré que les conducteurs automobiles prennent la décision d'initier un dépassement en fonction d'une *affordance* définie par le ratio entre les propriétés du système agent-environnement (la vitesse minimale satisfaisante pour réussir un dépassement (*MSV*)) et la propriété de l'agent, i.e., la limite d'action (vitesse maximale du véhicule conduit (*Vmax*)). Lors d'une deuxième expérimentation, nous avons interrogé l'utilisation préférentielle d'une seconde *affordance,* de haut niveau, à même de spécifier plus précisément et plus précocement les possibilités de dépasser. Nous avons mis en évidence que la décision d'initier un dépassement dépendait majoritairement de l'*affordance* de haut niveau *MSA*/*Amax*, définie par le ratio entre une propriété du système agent-environnement (accélération minimale satisfaisante pour réussir un dépassement (*MSA*)) et la propriété de l'agent (accélération maximale du véhicule conduit (*Amax*)). Dans une troisième expérimentation, nous avons questionné la capacité des conducteurs, lors de la réalisation d'un même dépassement, à exploiter des limites d'action distinctes, propres à chaque rapport de vitesse. Conformément à notre hypothèse, les conducteurs sont capables d'exploiter les possibilités de dépassement définies par le ratio entre les propriétés du système agent-environnement (accélération minimale satisfaisante pour réussir un dépassement (*MSA*)) et les propriétés de l'agent (accélération maximale du véhicule conduit en 4ème (*Amax 4ème*) et accélération maximale du véhicule conduit en 3ème (*Amax 3ème*)).

La formalisation de ces *affordances* nous a ainsi permis d'élargir le domaine d'application de l'*affordance-based control* (Fajen, 2007a) à des tâches de dépassement automobile très proches de situations rencontrées dans la vie réelle. De futures recherches seront nécessaires pour démontrer la fonction causale des *affordances* de dépassement modélisées dans le processus de sélection et de régulation de l'action. Cette étape nécessitera d'identifier très précisément les invariants optiques sous-jacents au dépassement et d'étudier les modalités de leur prise en compte.

MOTS-CLÉS : couplage perception-action, affordance, dépassement automobile, réalité virtuelle

---

DECISION-MAKING AND POSSIBILITIES FOR ACTION: NEW INSIGHTS INTO AFFORDANCES THEORY THROUGH THE CAR OVERTAKING

ABSTRACT: The main objective of this thesis is to validate the general hypothesis that car drivers select a mode of action (i.e., make the decision to overtake or not) and regulate it (i.e., control their automobile overtaking) by perceiving overtaking possibilities called affordances. These affordances are intrinsically scaled to the capacity for action of the vehicle driven (e.g., speed or acceleration). From the mathematical formalism of the affordance developed by Warren (1984) and the new conceptualization of the affordance provided by Fajen (2007a), it is about putting the theory of the affordances to the test of automobile overtaking through three experiments carried out on driving simulator.

In a first experiment, we showed that car drivers take the decision to initiate an overtaking on the basis of an affordance defined by the ratio between the properties of the agent-environment system (minimum satisfactory velocity to succeed an overtaking (*MSV*)) and the agent property, i.e., the action limit (maximum speed of the vehicle driven (*Vmax*)). In a second experiment, we tested the preferential use of a second overtaking affordance able to specify earlier and more precisely the overtaking opportunities. We have highlighted that the decision to initiate an overtaking depended mainly on a high order affordance, the *MSA*/*Amax*, defined by the ratio between a property of the agent-environment system (minimum satisfactory acceleration to succeed an overtaking (*MSA*)) and the property of the agent (maximum acceleration of the vehicle driven (*Amax*)). In a third experiment, we studied the selection and regulation of an action mode questioning the ability of drivers, when performing a same overtaking, to use various limits of action specific for each gear ratio. According to our hypothesis, drivers are able to exploit the overtaking opportunities defined by the ratio between the properties of the agent-environment system (minimum satisfactory acceleration to succeed an overtaking (*MSA*)) and the agent's properties (maximum acceleration of the vehicle driven in 4th gear (*Amax 4th*) and maximum acceleration of the vehicle driven in 3rd gear (*Amax 3rd*)).

The formalization of these possibilities for action allowed us to expand the scope of the affordance-based control (Fajen, 2007a) to the overtaking tasks which are very close of situations encountered in daily life and to take a new look at this kind of tasks. Future research will be needed to demonstrate the causal function of the overtaking affordances implemented in the process of selection and regulation of action. This step will imply to identify very precisely the optical invariant underlying the overtaking and to study how they are taken into account, especially when a competition between affordances occurs.

KEYWORDS: perception-action coupling, affordance, overtaking, virtual reality