



HAL
open science

Hiérarchie des niveaux de contrôle de l'activité en conduite automobile: application au contrôle de trajectoire et à la coopération homme-machine

Franck Mars

► **To cite this version:**

Franck Mars. Hiérarchie des niveaux de contrôle de l'activité en conduite automobile: application au contrôle de trajectoire et à la coopération homme-machine. Psychologie. Université de Rennes 2, 2016. tel-02938094

HAL Id: tel-02938094

<https://hal.science/tel-02938094v1>

Submitted on 14 Sep 2020

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

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

Université de Rennes 2

Habilitation à Diriger des Recherches

École Doctorale Sciences humaines et sociales (ED 507 SHS)
Spécialité : Psychologie expérimentale et ergonomique

Hiérarchie des niveaux de contrôle de l'activité en conduite automobile : application au contrôle de trajectoire et à la coopération homme-machine

Volume 1 : Contribution théorique et synthèse des travaux

Présentée et soutenue publiquement le 29 novembre 2016 par

Franck MARS

Chargé de Recherche au CNRS
Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes

Jury

Thierry BACCINO, Professeur à l'Université de Paris VIII, rapporteur

Yann COELLO, Professeur à l'Université de Lille 3, rapporteur

Frédéric DEHAIS, Professeur à l'ISAE-SUPAERO, examinateur

Andras KEMENY, Professeur associé à Arts et Métiers ParisTech, examinateur

Daniel MESTRE, Directeur de Recherche au CNRS, rapporteur

Jean-Christophe POPIEUL, Professeur à l'Université de Valenciennes, examinateur

Jean-Louis VERCHER, Directeur de Recherche au CNRS, examinateur

Remerciements

Ecrire un manuscrit d'HDR est un exercice personnel et solitaire, mais cela résulte d'influences plus ou moins directes que je tiens à citer.

Les influences les plus précoces furent celles de mes mentors scientifiques : Jacques Honoré, Jean-Marie Coquery et Jean-Louis Vercher. Merci à eux pour avoir lancé la machine il y a longtemps déjà. Leur contribution à la construction de ma pensée scientifique se retrouve à l'évidence dans ces pages.

Un grand merci également à Jean-Michel Hoc pour m'avoir accueilli dans son équipe, pour m'avoir initié à la problématique de la coopération homme-machine et pour les nombreux échanges passionnés et passionnants durant nos huit années de collaboration.

High five à la team PsyCoTec, Isabelle Milleville et Camilo Charron en premier lieu, mais aussi tous les doctorants et post-doctorants avec qui j'ai eu le plaisir de travailler : Jordan Navarro, Mathieu Deroo, Thomas Denoual, Louay Saleh, Ilja Frissen, Lauriane Pouliquen-Lardy, Marie Hoarau et Ablamvi Ameyoe.

L'IRCCyN m'aura fourni un cadre de travail ô combien enrichissant : merci à tous les collègues automaticiens, roboticiens, traiteurs de signal, informaticiens pour m'avoir collectivement initié aux problématiques de l'ingénierie et de la cybernétique. Une pensée toute particulière pour Philippe Chevrel qui m'a apporté beaucoup.

Merci aux membres du jury de soutenance d'avoir accepté de décortiquer mes écrits, en espérant que l'expérience fut stimulante.

Et puis, *last but not least*, toute mon affection à Emilie pour sa patience et son soutien lors de cette trop longue phase de rédaction. A mes filles également pour m'avoir permis de relativiser l'importance de tout ça.

Sommaire

1. Préambule	7
1.1 Un coup d'œil dans le rétroviseur	7
1.2 Inspection du véhicule	9
1.3 Aide à la navigation disciplinaire	10
1.4 Planification de l'itinéraire	12
2. Hiérarchie des niveaux de contrôle du comportement et conduite automobile	13
2.1 L'organisation hiérarchique de la conduite	14
2.3 Les modèles hiérarchiques de la cognition	17
2.4 Les bases neuro-anatomiques du contrôle hiérarchique	23
2.2 Contrôle sensorimoteur et contrôle cognitif	26
2.5 Le cas de (la) conscience	32
2.6 Synthèse : définition d'un modèle hiérarchique du conducteur à quatre niveaux	35
3. La modélisation du contrôle de la trajectoire	39
3.1 Le contrôle visuel de la trajectoire	39
3.1.1 Un contrôle visuel à deux niveaux	39
3.1.2 Déterminants optiques, visuomoteurs et cognitifs de l'anticipation visuelle	42
3.2 Retours d'effort et perception des accélérations latérales	50
3.2.1 Information inertielles et contrôle de la trajectoire	51
3.2.2 Retour haptique au volant et contrôle de la trajectoire	52
3.2.3 Rôle dans la construction des marges de sécurité	53
3.2.4 Le cas de la perception des pertes d'adhérence	55
3.3 Modélisation cybernétique du contrôle latéral	58
4. Coopération homme-machine pour le contrôle de la trajectoire	64
4.1 Classification des modalités d'assistance à la conduite	64
4.2 Perception augmentée : vers une aide visuelle au contrôle de la trajectoire	68
4.2.1 Les afficheurs tête-haute : conduire en réalité augmentée	68
4.2.2 Guider le regard pour aider au contrôle de la trajectoire	69
4.2.3 Vers une vision périphérique augmentée	72
4.3 L'amorçage haptique du geste de correction de trajectoire	73
4.3.1 Principe et définition de l'amorçage haptique	73
4.3.2 Amorçage haptique et diagnostic de la situation	74
4.3.3 Modulation et inhibition de l'amorçage haptique	77
4.3.4 Amorçage haptique et préparation motrice	80
4.3.5 Acceptabilité de l'amorçage haptique	82
4.4 Le contrôle partagé de la direction	84
4.4.1 La problématique du contrôle partagé	84
4.4.2 A la recherche du meilleur partage entre conducteur et automate	85
4.4.3 L'adaptation au contrôle partagé	88
4.4.4 Vers un partage piloté par un modèle du conducteur	92
4.5 Délégation du contrôle latéral, prise d'information et reprise en main	95
5. Synthèse et perspectives	98
5.1 L'organisation hiérarchique du contrôle de la trajectoire	98
5.2 Application à l'ergonomie des assistances à la conduite	103
5.3 Sur la route de l'avenir	106
6. Bibliographie	109

1. Préambule

Le manuscrit que vous vous apprêtez à consulter porte sur les activités de recherche que j'ai menées à l'IRCCyN depuis une dizaine d'années environ. Au-delà de la synthèse des travaux auxquels j'ai participé durant ce laps de temps, j'ai souhaité prendre le temps de la réflexion afin de proposer une contribution théorique plus générale sur l'articulation des niveaux de contrôle du comportement et son application à la modélisation du contrôle de la trajectoire et de la coopération homme-machine en conduite automobile. Cette contribution se veut être un cadre de pensée pour l'avenir, mais, à bien des égards, elle prend sa source dans mes travaux plus anciens. Je vais donc les évoquer en préambule, sans chercher à expliciter le contenu des travaux, ni même définir certains termes qui pourront paraître abscons au non-spécialiste, mais plutôt pour montrer la cohérence de mon parcours au regard de l'objectif théorique affiché. Puis, je présenterai l'objet scientifique dont il sera question dans le reste du document, ainsi que la démarche interdisciplinaire que j'ai adoptée pour l'étudier. Il ne me restera qu'à présenter l'organisation du document avant de mettre la clé dans le contact pour un trajet qui, je l'espère, ne sera pas trop monotone.

1.1 Un coup d'œil dans le rétroviseur

Difficile pour moi de situer le point de départ du parcours qui m'a amené jusqu'à aujourd'hui. Le véritable déclic fut, je crois, celui de l'obturateur d'un tachistoscope que j'ai utilisé lors de ma toute première initiation à la recherche en année de licence à l'Université de Lille 3. Le travail d'étude consistait en la réplique d'une expérience de Rock et Linnett (si mes souvenirs sont bons) dans laquelle des illusions perceptives était générées par la présentation ultra-rapide de deux stimuli successifs. Leurs caractéristiques élémentaires, perçues de façon pré-attentive, se recombinaient en un percept unique souvent erroné. Ce fut là non seulement ma première expérience concrète de l'expérimentation en psychologie, mais aussi la première occasion de réfléchir à la façon dont pouvaient se combiner des processus de très bas niveau du traitement de l'information visuelle avec des processus dits supérieurs qui conditionnent l'expérience consciente du monde.

L'année suivante, le travail d'étude devint « et de recherche » et j'allai frapper pour cela à la porte de Jean-Marie Coquery, professeur (passionnant) de psychophysiologie et directeur du Laboratoire de Neurosciences du Comportement à Lille 1. Celui-ci m'orienta vers Jacques Honoré, chercheur au CNRS, qui me parla de codage de l'espace, de référentiels spatiaux et de pointages droit devant soi. Ravi autant qu'abasourdi, je ne crois pas avoir prononcé plus de trois phrases durant la conversation jusqu'à ce que celui qui allait devenir mon premier mentor scientifique me mit une pile d'articles entre les mains avec pour mission de revenir le voir avec une idée d'expérience à réaliser. Parmi ces articles, un en particulier m'interpella, celui de Gurfinkel et Levick (1991) qui montrait comment l'asymétrie du tonus musculaire des jambes était fonction de rotations effectives de la tête, mais aussi de rotations illusives de celle-ci. Ces résultats suggéraient l'existence au sein du système nerveux central d'un modèle interne de l'organisation des différents segments du corps, le schéma corporel, dont la manifestation perceptive consciente pouvait influencer l'organisation des activités motrices les plus élémentaires. J'eus donc l'idée de reproduire cette illusion de rotation de la tête pour voir dans quelle mesure elle s'accompagnait d'une

déviations d'un pointage droit devant, conçu comme un indicateur de la segmentation de l'espace égocentré. L'expérience fut un succès et mit en évidence l'influence sur le contrôle sensorimoteur d'une illusion d'origine centrale, créée en maintenant constantes les entrées sensorielles (Mars, Honoré, Richard, & Coquery, 1998).

Mon D.E.A. aurait dû logiquement s'inscrire dans la continuité de cette expérience, mais les contrats faisant déjà loi à l'époque, je fus encouragé à m'investir dans un projet financé par l'institut UPSA portant sur la perception de la douleur tonique. La problématique n'en fut pas moins intéressante, puisqu'il s'agissait de déterminer dans quelle mesure l'orientation des yeux influençait des sensations de douleurs générées sur les mains par des trains d'impulsions électriques d'intensité croissante. Les résultats ont montré une augmentation significative des seuils de désagrément et de douleur lorsque les yeux étaient dirigés vers l'hémi-espace de la main stimulée. Or, l'orientation des yeux peut être considérée comme la composante motrice de l'attention spatiale. Il a donc s'agit cette fois de démontrer l'influence d'un acte moteur, hors de tout traitement symbolique, sur une perception ô combien subjective, largement déterminée par ailleurs par des facteurs cognitifs et émotionnels (Naveteur, Mars, & Crombez, 2005).

Après une année passée sous les drapeaux vint le temps de la thèse, que j'entrepris à l'UMR *Mouvement & Perception* de Marseille sous la direction de Jean-Louis Vercher. J'y ai étudié le rôle des entrées visuelles et vestibulaires dans la perception de l'orientation spatiale. Là aussi, la question de l'articulation des niveaux de perception et de contrôle du mouvement s'est rapidement imposée, car si les manipulations sensorielles étaient parfaitement asymboliques (cadre visuel présenté en vision périphérique, stimulation galvanique vestibulaire) et la tâche très simple (mettre un objet à la verticale), la perception était en fait évaluée à un niveau très intégré. Par exemple, l'effet du cadre visuel ne pouvait être interprété sans faire référence à la littérature sur la dépendance-indépendance à l'égard du champ, considéré par beaucoup comme un style cognitif dépassant largement le domaine de la perception visuelle (Mars et al., 2005; Mars, Vercher, & Blouin, 2004). Concernant les études utilisant la stimulation galvanique, nous avons montré que la modulation de la fréquence de décharge du nerf vestibulaire influençait la verticale subjective visuelle selon deux effets d'ordres très différents qui s'additionnaient : un effet strictement sensorimoteur (contre-torsion oculaire non compensée) et un effet relevant de traitements perceptifs beaucoup plus intégrés (inclinaison du référentiel gravitaire, cf. Mars, Popov, & Vercher, 2001). L'étude suivante a d'ailleurs permis de remettre en cause l'idée que le système nerveux central élaborait un unique modèle interne de la gravité sur lequel l'ensemble des perceptions spatiales s'appuieraient (Mars, Vercher, & Popov, 2005). La question de la mise à jour de ce(s) modèle(s) interne(s) de la gravité était également au centre d'une étude menée en microgravité avec mon compère et ami Lionel Bringoux en parallèle à mon travail de thèse (Carriot et al., 2004).

Mon travail doctoral aura également été l'occasion pour moi d'inscrire une recherche fondamentale dans une perspective applicative. Il s'agissait d'une thèse CIFRE cofinancée par Dassault Aviation dont la problématique était de concevoir des postes de pilotage et des systèmes d'information qui réduisent autant que faire se peut les risques de désorientation spatiale chez les pilotes. Rapidement, un point crucial apparut : les phénomènes de désorientation spatiale étaient largement dus à des configurations sensorielles et à des dynamiques de stimulation en vol mettant en défaut les systèmes sensorimoteurs, et l'entraînement intensif des pilotes consistait essentiellement à « court-circuiter » leurs

sensations en s'appuyant sur le traitement de multiples informations symboliques dispensées par les instruments de bord. Là encore, la question de l'articulation des niveaux de contrôle de l'activité était centrale. L'ancrage de cette question fondamentale dans des applications comme la conception des afficheurs de casque en réalité augmentée ou l'entraînement des pilotes aux sensations vestibulaires fut pour moi un élément supplémentaire de motivation.

Je passe rapidement sur ma première année postdoctorale que j'ai passé dans l'équipe d'Anatol Feldman à Montréal si ce n'est que ce choix de mobilité n'était pas anodin. Alors que j'avais la possibilité de continuer dans la ligne droite de mes travaux de thèse à l'Imperial College of London, j'ai préféré intégrer un laboratoire de contrôle moteur, car j'avais l'intuition qu'il y avait un peu trop de perception et pas assez d'action dans ma conception de la sensorimotricité. Je suis donc allé étudier la contribution de l'information vestibulaire à la coordination entre le bras et le tronc lors de mouvement d'atteinte vers une cible (Mars, Archambault, & Feldman, 2003). Au travers de cette recherche, l'objectif de montée en compétence dans le domaine du contrôle moteur fut au moins partiellement atteint. Cependant, j'eus rapidement le sentiment de m'être un peu trop éloigné de mes véritables centres d'intérêt scientifique. C'est pourquoi je n'ai guère hésité à répondre à l'offre faite par Jean-Michel Hoc de rejoindre l'équipe PsyCoTec de l'IRCCyN pour travailler sur la coopération homme-machine en conduite automobile, un objet de recherche qui m'apparaissait être au carrefour de mes expériences passées et de nouvelles routes à découvrir.

1.2 Inspection du véhicule

Mais pourquoi donc s'intéresser à la conduite automobile ? Bien plus qu'un terrain d'application, la conduite peut être décrite comme une activité dynamique complexe qui met en jeu des tâches d'ordres différents mais interdépendantes. Elle implique la planification du trajet et la navigation. Il faut également gérer l'interaction avec l'environnement (route et autres usagers) au travers d'un ensemble de procédures qui déterminent les manœuvres à effectuer, qu'elles soient explicitement dictées par le code de la route ou le fruit de l'expérience. Enfin, il faut mettre en œuvre des actions sur les commandes pour contrôler le véhicule. La conduite automobile repose donc sur différents niveaux de contrôle articulés entre eux.

Le propre des activités dynamiques est qu'elles s'effectuent dans un environnement changeant constamment et l'individu qui la pratique n'a qu'un contrôle partiel sur ces changements. Les aléas se traduisent par des erreurs qu'il faut corriger et des incertitudes qui se traduisent bien souvent en risques estimés plus ou moins consciemment. Le conducteur doit gérer des contraintes et des constantes de temps différentes selon le niveau de contrôle impliqué. La conduite automobile offre donc un terrain de recherche particulièrement riche. Le contrôle de la vitesse et de la trajectoire du véhicule pose à lui seul nombre de questions passionnantes sur la façon dont les processus sensorimoteurs qui gouvernent la locomotion s'expriment au sein d'un véhicule dont le déplacement est spécifique (vitesse élevée, trajectoire curvilinéaire, etc.) et spatialement contraint. Mais si le contrôle du déplacement repose en grande partie sur les processus perceptivo-moteurs, il dépend aussi largement des processus d'ordre supérieur, comme les motivations à effectuer le trajet, la propension à la prise de risque ou la prise en compte du comportement des

autres usagers. Or, les influences réciproques entre ces différents processus sont encore largement inconnues.

La conduite est aussi, par définition, une situation d'interaction homme-machine. La façon dont le conducteur intègre l'outil véhicule au sein de ses capacités d'action interroge les modèles généraux de l'apprentissage. De même, recréer une expérience de conduite réaliste dans un simulateur dont les capacités de restitution sensorielle sont limitées nécessite de s'appuyer sur des modèles de l'intégration multisensorielle. Avec la problématique de l'assistance à la conduite, le problème change de dimension, en particulier dans le cas où le système embarqué est un automate qui possède ses propres règles de décision et ses propres possibilités d'action. On substituera alors le terme de coopération à celui d'interaction, avec au cœur de la réflexion sur ces problèmes la notion d'interférence entre agents (Hoc, 2000). Si le conducteur et l'automate d'assistance œuvrent nécessairement dans le même but, la qualité de leur coopération dépendra de l'adéquation entre les analyses de la situation et les actions qu'ils opèrent en parallèle. La coopération homme-machine (CHM) devient alors une problématique à part entière : plutôt que de centrer uniquement la conception d'une assistance sur la performance de la machine elle-même ou sur celle de l'opérateur, on s'intéresse à la performance globale du système à la réalisation de la tâche commune (Hollnagel & Woods, 1983).

Plus spécifiquement, mon activité a porté sur la prévention des sorties de route en mettant l'accent sur les processus sensorimoteurs et cognitifs impliqués dans le contrôle de la trajectoire. Différentes formes de coopération ont été étudiées, de la perception augmentée à la délégation complète du contrôle latéral, en passant par des dispositifs d'alerte, d'amorçage du geste de correction ou de contrôle partagé du volant. D'une façon générale, ces travaux posent deux types de questions : (1) la compatibilité entre automates et conducteur en termes d'information à traiter et d'action à entreprendre sur le volant ; (2) la caractérisation de la qualité de la coopération entre les deux agents. Sur le premier type de question, les retombées consistent en un enrichissement mutuel des sciences du comportement et de l'automatique au niveau des modèles. Sur le second type de question, il s'agit de tirer le meilleur parti d'un automate en recherchant les modes de coopération les plus adaptés aux différents contextes. Les connaissances produites concernent la compréhension du fonctionnement du système homme-machine et non plus chacune de ses composantes prise isolément. Par ailleurs, l'interfaçage avec une assistance produit des connaissances en retour sur le contrôle de trajectoire chez le conducteur et sur les limites de l'automate, par exemple en termes de robustesse et de validité. Ces questions sont donc par nature pluridisciplinaires, voire interdisciplinaires.

1.3 Aide à la navigation disciplinaire

Mes recherches concernent de façon générale les processus perceptivo-moteurs mis en jeu par un opérateur humain en situation d'interaction homme-machine. D'un point de vue strictement disciplinaire, une des originalités de mes travaux réside dans l'apport de l'étude des processus perceptivo-moteurs à la psychologie ergonomique, généralement plus orientée vers les activités cognitives de plus haut niveau (supervision, diagnostic, planification, prise de décision, etc.), tout du moins dans la communauté francophone. Pourtant, la sensorimotricité fut au cœur de l'ergonomie dans les années 50, avec notamment les travaux sur la loi de Fitts (1954). Puis, avec l'essor de la psychologie

cognitive, l'accent s'est nettement porté sur le traitement de l'information symbolique. On observe à l'heure actuelle un regain d'intérêt pour la sensorimotricité, notamment autour du développement de la réalité virtuelle et des systèmes haptiques (Mestre, 2004).

Quoi qu'il en soit, la raison d'être de ma présence à l'IRCCyN, outre le fait de contribuer aux thématiques propres à ma discipline, est de créer des liens forts avec l'automatique afin de promouvoir une approche à l'interface entre les disciplines. J'ai personnellement beaucoup œuvré pour ces rapprochements depuis mon recrutement au CNRS. Paradoxalement, la pluridisciplinarité avec l'automatique s'est tout d'abord faite en dehors des murs de l'IRCCyN au travers des liens entre PsyCoTec et le LIVIC (IFSTTAR). Les projets ARCOS (PREDIT), PReVENT (6^{ème} PCRD), puis PREVENOR (ANR) ont formé les cadres de cette collaboration. Dans une démarche de conception des assistances à la conduite, il s'agissait en substance de fournir des entrées aux chercheurs en automatique sur les déterminants du contrôle de la trajectoire chez l'humain de sorte à ce qu'ils puissent développer des fonctions de risque de sortie de voie ou des assistances qui agissent en cohérence avec le conducteur. En retour, nous évaluons expérimentalement la qualité de la coopération entre les deux agents mis en situation. Cette démarche fut pluridisciplinaire dans la mesure où chaque équipe travaillait avec ses méthodes autour des mêmes objets de recherche. Elle fut sans aucun doute enrichissante, mais mon ambition était de dépasser la pluridisciplinarité pour aller vers l'interdisciplinarité où l'enrichissement réciproque se ferait au niveau des modèles. Il s'agissait en particulier d'intégrer les méthodes et concepts de la théorie de la commande et des sciences du comportement pour élaborer un modèle cybernétique du conducteur qui puisse être utilisé en retour au sein même d'automates d'assistance. Cet objectif fut réalisé (et continue de l'être) grâce à ma collaboration avec l'équipe Commande de l'IRCCyN, en particulier avec Philippe Chevrel. Le modèle, qui en est à sa deuxième mouture, outre son intérêt propre à représenter le comportement du conducteur, fut au cœur d'une démarche de conception d'un contrôle partagé du volant entre conducteur et automate (projet ANR PARTAGE) et est actuellement utilisé pour l'estimation de l'état du conducteur (thèse CIFRE Renault d'Ablamvi Ameyoe). Au titre de l'interdisciplinarité, mais dans un registre différent, j'ai également co-piloté avec Jean-François Petiot de l'équipe IS3P la thèse CIFRE Renault de Thomas Denoual. Il s'agissait cette fois de déterminer dans quelle mesure les modèles statistiques de l'analyse sensorielle pouvaient rendre compte des liens entre les indicateurs de la dynamique véhicule et le ressenti subjectif dans des situations de perte d'adhérence en simulateur.

Mon positionnement au carrefour de la psychologie expérimentale, de l'ergonomie cognitive et de l'automatique est reflété par l'encadrement de trois doctorants dans le domaine des sciences de l'ingénieur pour quatre doctorants psychologues. La meilleure configuration possible aura été de mener de concert une thèse en automatique (Louay Saleh) et une thèse en psychologie (Mathieu Deroo) autour du même objet de recherche, le contrôle partagé de la direction. Mon positionnement pluridisciplinaire se retrouve également dans les supports de publications choisis qui se partagent depuis 2006 à peu près équitablement entre la psychologie expérimentale, l'ergonomie et les revues d'ingénierie ouvertes à la modélisation de l'humain et aux interactions homme-machine. Cette démarche m'amène à la frontière de ma discipline d'appartenance, ce qui représente à mon avis une source d'enrichissement et une certaine originalité, mais aussi une prise de risque. C'est le cas sur le plan scientifique, car il est souvent plus confortable et plus « rentable » de se cantonner aux méthodes et aux concepts qui nous sont les plus intelligibles, mais aussi sur le plan institutionnel, car si

l'interdisciplinarité est souvent encouragée, le fait est que l'évaluation de l'activité des chercheurs dans le système académique favorise les ancrages disciplinaires forts.

Enfin, il est important de préciser que si les recherches que je mène sont souvent à caractère finalisé, avec un fort partenariat industriel, elles visent avant tout à produire des connaissances génériques et fondamentales sur le contrôle du déplacement et sur la coopération homme-machine. Cette question du rapport entre recherche fondamentale et ergonomie de conception n'est pas anodine, car elle détermine non seulement le choix des questions de recherche choisies, mais aussi les méthodes privilégiées pour y répondre. Mon positionnement à cet égard est très clair et consiste à privilégier une démarche ergonomique qui vise un juste équilibre entre validité écologique et contrôle expérimental. Dans tous les travaux que nous avons menés peut se poser la question de la relation entre les situations naturelles visées et les situations artificielles conçues pour les étudier. La tâche réelle de conduite, de par l'environnement complexe et riche en aléa dans laquelle elle s'exerce, nécessite un certain degré de simplification pour être étudiée expérimentalement. Cependant, j'ai toujours eu à cœur d'éviter les simplifications abusives telles qu'on peut les rencontrer (« conduite » passive, approche purement psychophysique, consignes irréalistes ou trop contraignantes, circuits stéréotypés, pour ne citer que quelques exemples), tout en évitant de noyer les processus visés dans une complexité non-pertinente. Il n'empêche que la ligne de crête entre trop ou trop peu de contrôle expérimental est difficile à suivre. Tout est histoire de compromis.

1.4 Planification de l'itinéraire

La suite du document est organisée en quatre chapitres. Le premier présente une réflexion théorique portant sur les modèles hiérarchiques du contrôle du comportement. Une première synthèse, sous la forme d'un modèle hiérarchique de la conduite, sera la contribution originale principale de ce manuscrit. Les deux chapitres suivants forment la synthèse des résultats expérimentaux obtenus ces dernières années, avec une mise en perspective par rapport à la littérature et quelques projets s'inscrivant dans la ligne droite des conclusions. Je présenterai tout d'abord mes travaux sur la modélisation du contrôle de la trajectoire, puis ceux portant sur l'assistance à la conduite selon quatre modalités de coopération homme-machine. Le dernier chapitre fera la synthèse de l'ensemble au travers d'une spécification du modèle hiérarchique général pour la question spécifique du contrôle de trajectoire, en mettant l'accent sur les articulations entre contrôle sensorimoteur et contrôle cognitif. Enfin, quelques pistes pour l'avenir à plus ou moins long terme seront tracées.

2. Hiérarchie des niveaux de contrôle du comportement et conduite automobile

Comme déjà mentionné dans le préambule, la conduite automobile est une activité dynamique qui implique plusieurs types de tâches réalisées à des niveaux de contrôle différents, allant du choix de la destination finale à l'exécution d'une action sur une commande en passant par la prise en compte de la signalisation et la gestion des interactions avec le trafic. Chaque type de tâche pris isolément a donné lieu à des quantités de travaux et à de nombreux modèles avec des niveaux d'abstraction et de granularité plus ou moins élevés. De nombreux auteurs s'accordent cependant à dire que l'une des questions les plus importantes et probablement les plus difficiles à résoudre est de déterminer selon quelle hiérarchie ces différentes tâches s'organisent (Ranney, 1994).

Avant de rentrer dans le vif du sujet, la question se pose de savoir ce qu'on entend par hiérarchie des niveaux de contrôle de l'activité. Dans le domaine de la conduite automobile, la description la plus largement répandue est celle d'une hiérarchie de tâches. Pour aller d'un point A à un point B, le conducteur doit tout d'abord planifier son itinéraire (tâche de navigation). Ensuite, il doit suivre le tracé de la route tout en respectant les règles de circulation et en évitant les collisions avec les autres usagers (tâches de guidage et de gestion des interaction). Enfin, le mouvement du véhicule se fait au travers des actions sur les commandes (tâche de contrôle véhiculaire).

Tout ceci peut aisément se décliner sous la forme d'une hiérarchie de buts : arriver à destination, maintenir des marges de sécurité, atteindre une vitesse cible sont autant de buts à satisfaire dont certains sont subordonnés à d'autres. Le but est d'ailleurs un élément centrale de l'approche cybernétique qui a largement contribué aux travaux sur la modélisation du conducteur (Macadam, 2003; Plöchl & Edelman, 2007) : le contrôle et la régulation du comportement d'un système, essentiel pour l'adaptation à un environnement dynamique, y est modélisée comme la comparaison d'un état désiré (le but) et un état réel, mesuré par les sens, l'écart entre les deux déclenchant une action correctrice jusqu'à ce que le but soit atteint. De fait, la plupart des comportements des organismes vivants sont dirigés par des buts, définis comme les résultats que l'on cherche obtenir par l'accomplissement d'une action ou d'un ensemble d'action. La réalisation du but par l'action est permise par le jeu d'un ensemble de processus de prédiction, de contrôle et de vérification.

Dès lors qu'on introduit la notion de processus de traitement de l'information, on peut parler de hiérarchie cognitive. Là encore, une distinction peut être opérée selon que l'on met l'accent sur la nature des traitements qui opèrent sur les informations ou sur la nature des représentations qu'ils génèrent. Une hiérarchie de processus sous-entend que les niveaux supérieurs opèrent sur des échelles de temps plus longues et modulent l'activité des processus subordonnés. Une hiérarchie de représentation sous-entend que les représentations d'ordre supérieur forment des abstractions des représentations du niveau inférieur, privilégiant les généralités aux détails et pouvant donc se décliner sous différentes formes vers les niveaux inférieurs. La plupart du temps, la hiérarchie s'envisage à la manière d'une hiérarchie militaire, c'est-à-dire de façon asymétrique, les niveaux supérieurs s'appuyant sur et pilotant les niveaux plus opérationnels, qui se contentent de remonter l'information. Cependant, on peut également concevoir les niveaux supérieurs comme des

processus ou des représentations qui émergent de l'activité des niveaux inférieurs, une vision plus compatible avec les approches écologiques ou enactionnistes, par exemple.

Dans une tâche complexe comme la conduite, la régulation de l'activité va s'exercer à différents niveaux du contrôle, dont on peut supposer que chacun a ses spécificités, ce qui implique des processus différents. Cela n'exclue pas des mécanismes communs : une boucle de régulation reste une boucle de régulation. Cependant, les parallélismes des niveaux de contrôle inférieurs se distinguent fortement du caractère sériel des niveaux supérieurs. De fait, la psychologie s'est beaucoup construite autour de distinctions théoriques binaires (Newell, 1973). La modélisation du contrôle de l'activité n'échappe pas à cette tendance et plusieurs dichotomies fondamentales ont été proposées au fil du temps : processus sensorimoteurs et cognitifs, processus automatiques et contrôlés, processus conscients et non-conscient, traitements implicites et explicites, comportements volontaires et involontaires, mémoires déclaratives et procédurales. Chacune de ces distinctions correspond à une certaine réalité, fortement liée aux objets d'étude considérés et aux méthodes expérimentales choisies pour les traiter. Définir des modèles hiérarchiques du contrôle de l'activité, qu'il s'agisse de la conduite ou d'un autre type de tâche, peut difficilement s'envisager sans y faire référence.

L'objectif de ce chapitre est de faire la synthèse théorique des modèles hiérarchiques existants, pour proposer une synthèse qui soit pertinente pour l'analyse des activités dynamiques à forte composante sensorimotrice, et en particulier pour la conduite automobile. Pour cela, nous commencerons par présenter les principaux modèles hiérarchiques de la conduite, puis nous élargirons le débat en considérant des pans de littérature souvent peu mis en rapport avec la modélisation du conducteur. Cela consistera en une revue des modèles hiérarchique de la cognition en psychologie et en neurosciences, puis en une clarification de la distinction entre contrôle sensorimoteur et contrôle cognitif. A l'issue de cette analyse, une première synthèse théorique sera proposée sous la forme d'un modèle conceptuel général de l'articulation des niveaux de contrôle en situation de conduite.

2.1 L'organisation hiérarchique de la conduite

Le meilleur point de départ d'une réflexion sur l'organisation hiérarchique de la conduite est très probablement le modèle de Michon (1985), un modèle largement cité dans la littérature et qui semble faire assez largement consensus. Michon (1985) propose de décrire l'activité de conduite selon trois niveaux distincts (Figure 1). Le niveau supérieur est le niveau stratégique, celui en charge de produire les plans généraux. Ces plans sont typiquement réalisés sous contraintes temporelles faibles, mais demandent des ressources cognitives fortes. Il s'agit du niveau de la planification de l'itinéraire (par où vais-je passer ?), en fonction de la définition des buts généraux (vais-je y aller vite pour honorer mon rendez-vous ?) et de l'estimation des coûts et risques associés (la présence de mes enfants à l'arrière du véhicule m'oblige à la prudence). Le niveau stratégique fournit au niveau inférieur un ensemble de sous-buts à réaliser et de critères de conduite à respecter. C'est le niveau des manœuvres, couramment désigné comme le niveau tactique, qui opère alors. Les contraintes temporelles sont plus fortes, puisque c'est la situation actuelle et sa projection dans les secondes à venir qui est analysée. Les critères sont appliqués pour donner lieu à des prises de décision pour dépasser un véhicule, traverser un carrefour, tourner à la prochaine

intersection ou déclencher une manœuvre d'évitement d'obstacle. L'exécution de la manœuvre est alors déléguée au niveau du contrôle, plus communément appelé le niveau opérationnel. Il s'agit ici du contrôle et de la régulation en ligne du véhicule au travers des actionneurs.

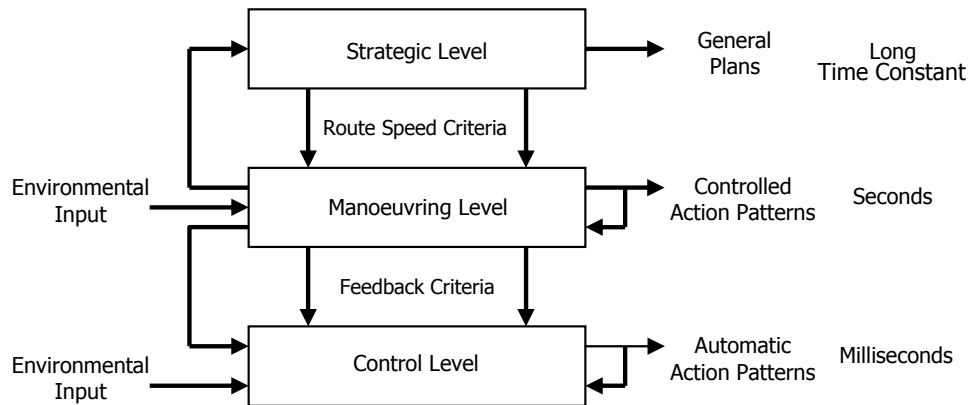


Figure 1 : L'organisation hiérarchique des niveaux de contrôle de l'activité de conduite selon Michon (1985)

A ce niveau de description, le modèle de Michon (1985) décrit plus l'organisation hiérarchique des tâches réalisées pendant la conduite que l'organisation des processus de traitement de l'information impliqués dans la réalisation de ces tâches. Michon (1985) souligne pourtant l'importance pour tout modèle global de formaliser les échanges d'information entre les niveaux, et en particulier ce qui détermine le passage d'un type de contrôle à un autre. De fait, seuls les liens entre niveau stratégique et niveau tactique sont explicités : les critères tactiques sont dérivés des buts définis au niveau stratégiques et, réciproquement, les buts peuvent être adaptés en fonction du résultat des manœuvres d'ordre tactique. Les liens entre les niveaux tactique et opérationnel sont peu discutés. On peut cependant noter que le niveau tactique semble piloter le niveau opérationnel sans qu'aucune remontée d'information directe dans l'autre sens n'apparaisse. Quant à la nature des processus impliqués, ils sont « contrôlés » au niveau supérieur et « automatique » au niveau inférieur. La distinction renvoie directement à celle formulée par Schneider et Shiffrin (1977), avec d'un côté (tactique), des processus sériels, adaptables à la situation et consommateurs de ressources attentionnelles, et de l'autre (opérationnel), des patterns d'action automatisés, activables en parallèle et sans contrôle volontaire. Nous reviendrons bientôt sur ce point (section 2.3), ainsi que sur les tentatives de mise en correspondance du modèle de Michon (1985) avec le modèle hiérarchique de Rasmussen (1983).

Plusieurs tentatives de modélisation conceptuelle s'apparentant à celle de Michon (1985) ont été proposées depuis. On peut retenir celle de Hatakka, Keskinen, Gregersen, Glad, & Hernetkoski (2002) qui proposent un modèle hiérarchique à quatre niveaux. Il s'agit d'une hiérarchie de buts et de motivations dominée par un certain nombre de connaissances, de traits de personnalité, de valeurs et de normes personnelles qui déterminent des attitudes générales vis-à-vis de la conduite. Si ce niveau n'est que très peu spécifique à la conduite, il détermine selon les auteurs en grande partie les comportements à risque. On y trouve par exemple la propension à chercher des sensations, à répondre à la pression sociale, à s'adonner à des pratiques addictives, etc. Subordonné à ce niveau, on retrouve un niveau dédié à la navigation et la planification (stratégique), un niveau concernant la maîtrise du trafic (tactique) et un niveau spécifique à la manœuvre du véhicule. Ce dernier niveau inclut

les habiletés élémentaires et fortement automatisées, ainsi que la représentation des propriétés dynamiques du véhicule.

Hollnagel, Nåbo et Lau (2003) proposent également un modèle hiérarchique en plaidant pour une approche plus fonctionnelle que structurelle (voir aussi Hollnagel, 2006). Selon cette approche, pour pouvoir rendre compte de la dynamique des processus mis en jeu dans la conduite, il y aurait nécessité de représenter la temporalité des boucles de contrôle. Pour cela, une condition essentielle est de considérer le système conjoint conducteur-véhicule et non pas le conducteur pris isolément. La conduite (et non pas le conducteur) est donc représentée par quatre boucles de contrôle opérant simultanément (Figure 2). Chaque niveau peut être représenté par une boucle liant buts, action et feedback, la perte de contrôle intervenant lorsque la somme du temps nécessaire à évaluer la situation (feedback et événements) et du temps à réaliser l'action pertinente dépasse le temps disponible donné par la relation véhicule-environnement (Hollnagel, Karlsson, Magnusson, & Taube, 2001; Hollnagel, 2002). Seule le type de contrôle impliqué (boucle ouverte ou boucle fermée) et la dynamique temporelle distinguent les différents niveaux. La boucle inférieure, dite de suivi (*tracking*), est la plus rapide. Elle n'opère qu'en boucle fermée et concerne le contrôle de la vitesse, de l'interdistance, de la position latérale, etc. Elle reçoit ses consignes (vitesse cible, changement de positionnement dans la voie de circulation) de la boucle de régulation (*regulating*). La régulation repose essentiellement sur un contrôle en boucle fermée, mais inclut des éléments d'anticipation et peut nécessiter des ressources attentionnelles, contrairement au tracking. La boucle de supervision (*monitoring*) traite plus directement du contexte de conduite comme le trafic, les aléas rencontrés pendant le trajet, la signalisation routière, ou encore l'état de la route et du véhicule. La part de contrôle en boucle ouverte est plus importante. Enfin, la boucle de ciblage (*targeting*) spécifie les buts généraux, comme la destination finale. Elle ne repose sur aucun feedback, mais plutôt sur une évaluation globale de la situation, comme par exemple l'estimation relativement imprécise de la distance restant à parcourir. Lorsque cette estimation devient plus fréquente, le contrôle s'apparente plutôt à de la supervision.

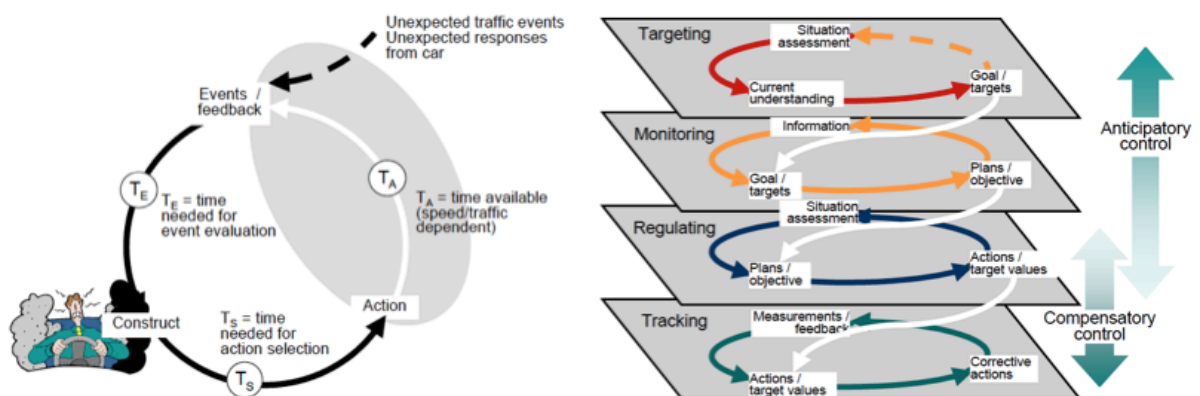


Figure 2 : Le modèle DiC (Driver in Control) de Hollnagel et al. (2003)

Salvucci (2006) propose une approche différente de la modélisation du conducteur en se basant sur l'architecture cognitive ACT-R (*Adaptive Control of Thought—Rational*). Ce type d'architecture repose en substance sur la définition d'un ensemble de connaissances déclaratives et de règles de production pour définir des modèles computationnels de la cognition (Anderson et al., 2004). En l'appliquant à la modélisation du conducteur, Salvucci (2006) distinguent trois composantes. La première, celle du contrôle, correspond selon

l'auteur au niveau opérationnel de Michon (1985) et concerne les coordinations sensorimotrices. Plus spécifiquement, deux lois de contrôle sont représentées, l'une en charge du contrôle latéral alimentée par l'évolution de deux angles en vision proche et lointaine (reprise de Salvucci & Gray, 2004 ; cf. section 3.1.1), l'autre en charge du contrôle longitudinal et fondée sur la régulation du temps inter-véhiculaire. Ces deux lois suffisent à représenter la conduite sur autoroute, mais d'autres processus pourraient être ajoutés pour étendre le domaine de validité du modèle. La deuxième composante, la surveillance (*monitoring*), est celle du maintien de la conscience de la situation. Ce maintien s'effectue au travers de la vérification fréquente et plus ou moins aléatoire des alentours du véhicule afin de vérifier la présence d'autres usagers. Là encore, d'autres vérifications pourraient être envisagées, comme la présence d'obstacles ou de panneaux de signalisation, par exemple. D'après Salvucci (2006), ces processus relèvent du niveau tactique de Michon (1985), tout comme ceux de la troisième composante, celle de la prise de décision, qui va déclencher les manœuvres de changement de voie sur autoroute et qui pourrait décider de freiner, de tourner ou de vérifier un instrument dans d'autres circonstances.

Ce modèle, comme plus largement les architectures de type ACT-R, n'est pas sans poser un certain nombre de difficultés. Par exemple, Le caractère très sériel du traitement de l'information prédit que toute distraction se traduit en un partage séquentiel des ressources de traitement entre la tâche de conduite et la tâche secondaire, ce qui mène nécessairement à une baisse de performance de la première. Or, il a été montré à plusieurs reprises qu'une distraction cognitive pouvait mener à une amélioration du contrôle véhiculaire dans certaines conditions (Medeiros-Ward, Cooper, & Strayer, 2014). Plus généralement, ce modèle met au centre des processus de contrôle un arbitrage cognitif déterminant toute prise d'information et toute exécution d'action, en les intercalant. Cependant, l'approche de Salvucci (2006) possède certaines particularités qui me semblent fort intéressantes. Premièrement, la prise de décision est conçue ici comme la conséquence de la remontée d'information des niveaux inférieurs. Nous ne sommes pas ici dans une conception où la spécification des buts relève de processus prescripteurs qui piloterait la réalisation de l'action à un niveau d'abstraction plus élevé. Deuxièmement, Salvucci (2006) a le mérite d'opérationnaliser le concept de conscience de la situation d'Endsley (1995) en le situant non pas comme un modèle mental global du monde, mais un ensemble de processus de vérification de l'état du monde qui s'opère à un niveau implicite, entre les boucles perceptivo-motrices et les processus de prises de décision. C'est cette propriété du modèle en particulier que je retiendrai pour la suite.

2.3 Les modèles hiérarchiques de la cognition

Afin d'élargir la réflexion, quittons le domaine de la modélisation du conducteur pour explorer la littérature sur les modèles hiérarchiques de la cognition. A bien des égards, la question de la hiérarchie des processus de traitement de l'information a pris sa source dans ce qu'il convient d'appeler les modèles de ressources (Wickens, 2002). Leur principe est que la capacité d'un individu à traiter de l'information et à réaliser une ou plusieurs tâches en parallèle est limitée, car il ne dispose que d'une quantité donnée de ressources mentale/cognitive/attentionnelle (Broadbent, 1958; Kahneman, 1973; Moray, 1967). L'idée que l'individu puise dans un réservoir de ressources implique qu'une tâche donnée va préempter tout ou partie de ces ressources et que la partie restante, les ressources résiduelles, peuvent être affectées à une tâche secondaire. Lorsque la tâche secondaire

demande plus de ressources que disponible, la performance dans l'une des deux tâches ou dans les deux diminuera invariablement. Cependant, il est vite apparu que certaines tâches routinières, essentiellement des tâches perceptivo-motrices, ne demandent pas de ressources, ce qui a mené à la notion d'automatisation de la tâche (Fitts & Posner, 1967).

La notion d'automatisation a été formalisée par Schneider et Shiffrin (1977), puis de façon plus étendue par Norman et Shallice (1986). Cette théorie du traitement de l'information, même si elle a été développée comme une théorie de l'attention, distingue deux types de processus fondamentalement différents : les processus automatiques et contrôlés. Les processus dits automatiques reposent sur un ensemble de routines, ou schémas, acquis au fil de la répétition des tâches. Chaque schéma peut être activé selon une configuration d'information donnée, qu'elle soit issue de l'environnement ou interne, sans nécessiter de ressources de traitement et sans prise de conscience. La compétition entre schémas serait gérée de façon semi-automatique par un gestionnaire de priorités de déroulement. Lors de situations nouvelles ou difficiles intervient le système attentionnel superviseur qui va permettre d'interrompre et de modifier les schémas en court. Les processus sont dits alors contrôlés. Ils opèrent un traitement sériel de l'information, adaptable à la situation. Le contrôle devient volontaire et coûteux en termes de ressources, donc limités dans sa capacité de mise en œuvre. Dans cette conception, le contrôle automatique intègre les coordinations sensorimotrices et les règles d'action devenues implicites par répétition, alors que le contrôle volontaire se limite aux processus conscients de (re)planification de l'action.

Les processus automatiques sont plus efficaces de par leur rapidité et leur capacité à être exécutés en parallèle sans ressources attentionnelles, mais ils sont sous la supervision permanente des processus contrôlés qui assurent l'inhibition des schémas d'action ou leur redéfinition lorsque ceux-ci s'avèrent inadaptés au contexte. Cependant, il a été rapporté à de nombreuses reprises un effet délétère de la supervision sur la performance à des tâches manuelles expertes. Logan et Crump (2009) montrent par exemple une baisse de performance dans une tâche de dactylographie dès lors qu'une activité réflexive sur la réalisation de la tâche est induite. Selon ces auteurs, l'explication réside dans le fait que les activités manuelles expertes, telles que la dactylographie, reposent sur deux boucles de contrôle qui fonctionnent en parallèle. Une boucle dite externe est en charge de la sélection des mots à taper, alors qu'une boucle dite interne, car encapsulée dans la première, est en charge de contrôler l'exécution des mouvements vers chacune des touches du clavier. Inciter le dactylographe à porter attention à ses mouvements reviendrait à faire en sorte que la boucle externe supervise les entrées-sorties de la boucle interne, ce qui ne devrait intervenir qu'exceptionnellement en cas d'erreur. Récemment, Medeiros-Ward, Cooper et Strayer (2014) ont repris cette conception pour expliquer pourquoi une distraction cognitive peut mener à une détérioration du contrôle latéral, mais aussi parfois à une amélioration qui peut sembler paradoxale. Ils montrent que l'amélioration du contrôle latéral ne s'observe que lorsqu'il ne subit aucune forme de perturbation à la base. Dans ce cas, le contrôle latéral est entièrement délégué à la boucle interne pendant que la boucle externe traite l'information nécessaire à la réalisation de la tâche distractive. Si, au contraire, le contrôle latéral est perturbé (en l'occurrence par un vent latéral aléatoire), la boucle externe supervise la boucle interne et toute tâche secondaire viendra perturber cette supervision et, par conséquent, le contrôle latéral lui-même. Selon ces auteurs, les processus contrôlés et automatiques sont donc organisés hiérarchiquement sous forme d'encapsulation, au sens de Fodor (1983).

Référence incontournable dans le domaine des facteurs humains et de l'interaction homme-machine, le modèle de Rasmussen (1983), dit modèle SRK (Skills, Rules, Knowledge), est une évolution naturelle des théories précédentes vers la description d'un continuum entre les tâches coûteuses en ressource et les tâches automatisées. Il propose de distinguer trois niveaux de contrôle pour expliquer le comportement dans un environnement dynamique (Figure 3). Les trois niveaux sont organisés de façon hiérarchique. Ils se distinguent par leur rôle fonctionnel, mais aussi par la nature et le niveau d'abstraction des informations qu'ils traitent.

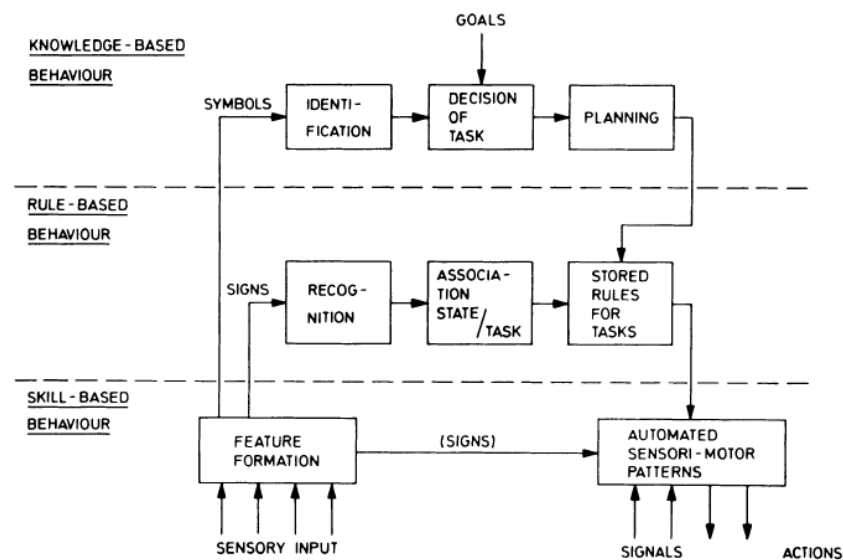


Figure 3 : Le modèle SRK : les niveaux de contrôle d'un opérateur humain selon Rasmussen (1983)

Le niveau des comportements dirigés par des *habiletés* correspond aux coordinations sensorimotrices « automatisées » qui s'effectuent sans contrôle conscient, de façon fluide, et qui sont des configurations d'actions hautement intégrées. Il peut s'agir comme dans une tâche de tracking d'une simple boucle de rétroaction. Il peut également s'agir de routines plus intégrées comme conduire un vélo ou jouer une partition. Ce type de contrôle est alimenté par des *signaux* sensoriels continus qui sont autant d'indicateurs de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement. La fonction fondamentale de ce niveau de contrôle est précisément de synchroniser les mouvements de l'individu aux signaux sensoriels qui ne sont pas porteur en soi de signification. Cependant, Rasmussen (1983) précise que les comportements peuvent également être déclenchés ou guidés à ce niveau de contrôle par des configurations d'information données agissant comme des indices ou *signes*. Il s'agit ici d'une réelle ambiguïté du modèle SRK, comme nous aurons l'occasion d'y revenir. Quoiqu'il en soit, l'ensemble des comportements d'un individu peut donc se résumer à un enchaînement des routines exécutées au niveau des habiletés, routines qui vont être séquencées et modulées dans leur mise en œuvre par les niveaux supérieurs.

Le niveau des comportements dirigés par des *règles* organise les séquences de routines selon un ensemble de règles ou procédures élaborées au fil de l'expérience ou transmises sous forme de savoir-faire par un tiers. Les procédures mise en jeu dans le passé et s'étant avérées fructueuses sont retenues au détriment des autres. A ce niveau, l'information est traitée sous forme de *signes*, c'est-à-dire des configurations d'information ayant valeur de signification dans l'environnement sans toutefois être de l'ordre du concept. Il s'agit davantage d'un état, d'une situation ou d'une icône de l'environnement qui est identifié

selon une convention donnée ou une expérience passée. Ces signes sont utilisés pour sélectionner ou modifier une règle de séquençement des routines d'action. La fonction fondamentale du niveau des règles est donc d'associer à un état reconnu dans l'environnement une ou des règles d'action.

Selon Rasmussen lui-même, la frontière entre le niveau des habiletés et le niveau des règles n'est pas nette et dépend beaucoup du niveau d'entraînement de l'individu dans la tâche en cours et de l'attention qu'il y porte. La distinction se fait essentiellement autour du caractère plus ou moins conscient et explicite du contrôle de l'activité. En général, le niveau des habiletés opère sous le seuil de la conscience et l'individu est incapable de décrire comment et sur la base de quelle information il contrôle sa performance, alors que le niveau des règles s'appuie sur des savoir-faire explicites dont les procédures sont aisément verbalisables.

Dans les situations nouvelles où aucune des règles acquises n'est adaptée, le contrôle de l'activité nécessite de faire appel à des processus opérant à un niveau d'abstraction supérieur, le niveau des comportements dirigés par des *connaissances*. Sur la base des connaissances et des buts généraux de l'individu, ainsi que de l'analyse de la situation, des processus de prise de décision sont mis en jeu pour aboutir à un ou des plans d'action futurs qui pourront être testés empiriquement ou simulés de façon interne. Ce niveau de contrôle nécessiterait un modèle mental abstrait du monde environnant permettant de faire des prédictions globales à long terme. Les informations traitées à ce niveau sont des *symboles*, c'est-à-dire des représentations conceptuelles qui décrivent des propriétés fonctionnelles de l'environnement et qui peuvent être combinées dans le cadre d'un raisonnement logico-déductif.

Selon l'approche de Rasmussen (1983), le développement de l'expertise dans une tâche consiste en une procéduralisation des séquences d'action, en un passage d'un mode déclaratif descendant (top-down) à un mode automatisé ascendant (bottom-up) en passant par un mode intermédiaire associatif. Avec l'entraînement, le contrôle de l'activité passe de processus généraux et flexibles, mais lents, à des processus spécifiques et rigides, mais rapides. L'expertise revient donc à laisser se reposer le contrôle de l'activité sur les habiletés pour libérer des ressources symboliques, ce qui génère une moindre charge de travail par rapport aux novices.

L'organisation hiérarchique des niveaux de comportement tels que décrits par Rasmussen (1983) évoque assez directement les trois niveaux de conduite de Michon (1985) tels que décrits plus haut. De fait, de nombreux auteurs superposent les deux modèles, tout du moins pour des conditions habituelles de conduite et des conducteurs expérimentés. Le niveau stratégique correspondrait pour l'essentiel au niveau des comportements dirigés par des connaissances, le niveau tactique à celui des comportements dirigés par des règles, et le niveau opérationnel à celui des comportements dirigés par des habiletés. Cependant, les niveaux des deux approches peuvent être dissociés dans certains cas. Citons par exemple le cas de la première leçon de conduite où l'enchaînement des gestes nécessaires au contrôle opérationnel du véhicule est réalisé (laborieusement) grâce à l'application de règles fraîchement acquises. De même, le contrôle de trajectoire sur sol glacé qui, parce qu'il ne peut pas être réalisé en mettant en œuvre les habiletés habituellement efficaces, fera intervenir même chez des experts le niveau des règles, voire des connaissances.

Donges (1999) met également en parallèle le modèle SRK avec un modèle à trois niveaux similaire à celui de Michon (1985). Le conducteur y est décrit comme une organisation

hiérarchique de trois types de contrôle : la navigation, le guidage et la stabilisation (Figure 4). La navigation est l'équivalent direct du niveau stratégique et ne dépendrait que du niveau des comportements dirigés par les connaissances. L'essentiel de la dynamique de la conduite résiderait sur les niveaux de guidage et de stabilisation qui diffèrent essentiellement par le type de contrôle réalisé : contrôle en boucle ouverte pour le guidage et contrôle en boucle fermée pour la stabilisation. Le guidage spécifie trajectoire et vitesse désirées et la stabilisation les réalise. D'après l'auteur, la stabilisation dépend uniquement du niveau des habiletés qui est considéré ici comme un ensemble de processus de très bas niveau (« reflex-like, stimulus-response mechanisms ») dépendant de structures sous-corticales. Le guidage dépendrait lui des trois niveaux SRK. L'apprentissage de la conduite consisterait à développer un répertoire de règles de comportements et à acquérir la capacité de les employer inconsciemment. Au bout d'un temps, la conduite reposerait essentiellement sur les habiletés et ce n'est que l'apparition de situations critiques qui activerait le niveau des règles (si un pattern de réponse adéquat est disponible en mémoire associative), voire le niveau des connaissances si la situation n'est pas familière ou trop complexe.

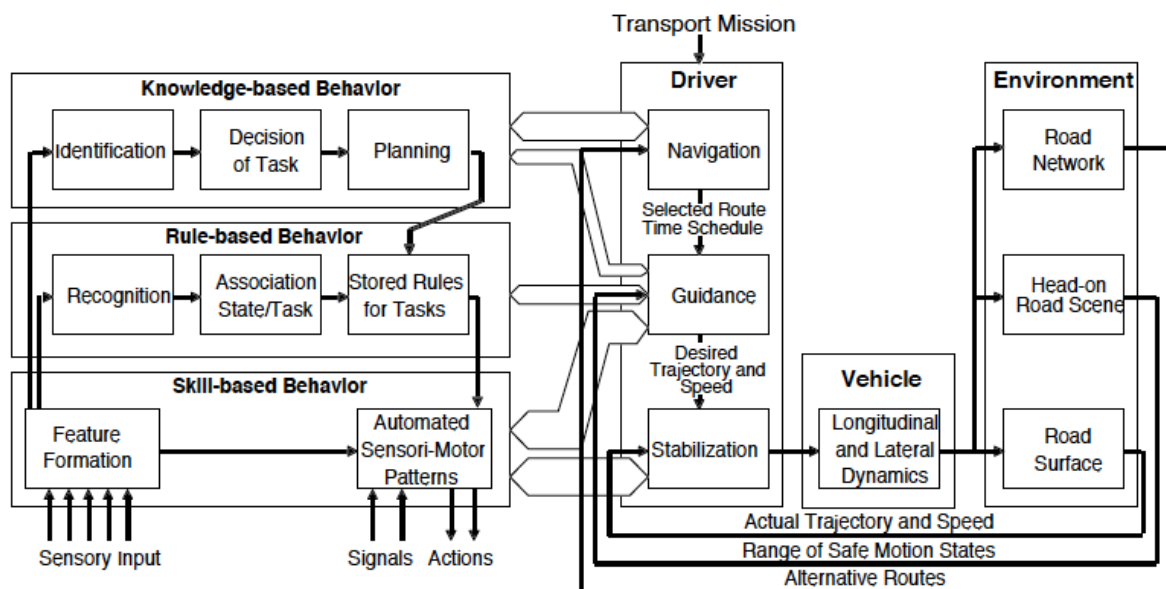


Figure 4 : Mise en parallèle du modèle SRK de Rasmussen (1983) et du modèle navigation-guidage-stabilisation telle que proposée par Donges (1999).

Par contraste avec les modèles présentés jusqu'ici, le modèle de Hoc et Amalberti (2007) propose que la nature du contrôle cognitif opéré par un individu en situation dynamique peut être décrit selon deux dimensions (Figure 5). La première correspond au niveau d'abstraction des données utilisées pour le contrôle. Elle distingue le contrôle symbolique, engageant des processus interprétatifs et contrôlés, du contrôle subsymbolique, qui inclut les boucles sensorimotrices et les automatismes cognitifs acquis par la répétition et l'expertise (l'ensemble étant résumé par le terme « routines »). Cet axe correspond à une relecture du modèle SRK, vu comme un continuum, le contrôle symbolique incluant le niveau des règles et des connaissances de Rasmussen (1983). Le modèle précise également les relations entre niveaux : supervision des routines par le contrôle symbolique (qui assure l'adéquation entre le résultat des automatismes et les intentions super-ordonnées) et émergences cognitives lorsque les routines sont perturbées, deviennent inadaptées ou inopérantes (retour à un contrôle symbolique nécessaire). La seconde dimension du modèle

correspond à l'origine des données utilisée pour le contrôle en faisant la distinction entre données d'origine externe (issues de l'environnement) et données d'origine interne. Cette distinction quant à l'origine des données se confond avec la nature du contrôle, réactif (guidage externe) ou anticipatif (guidage interne).

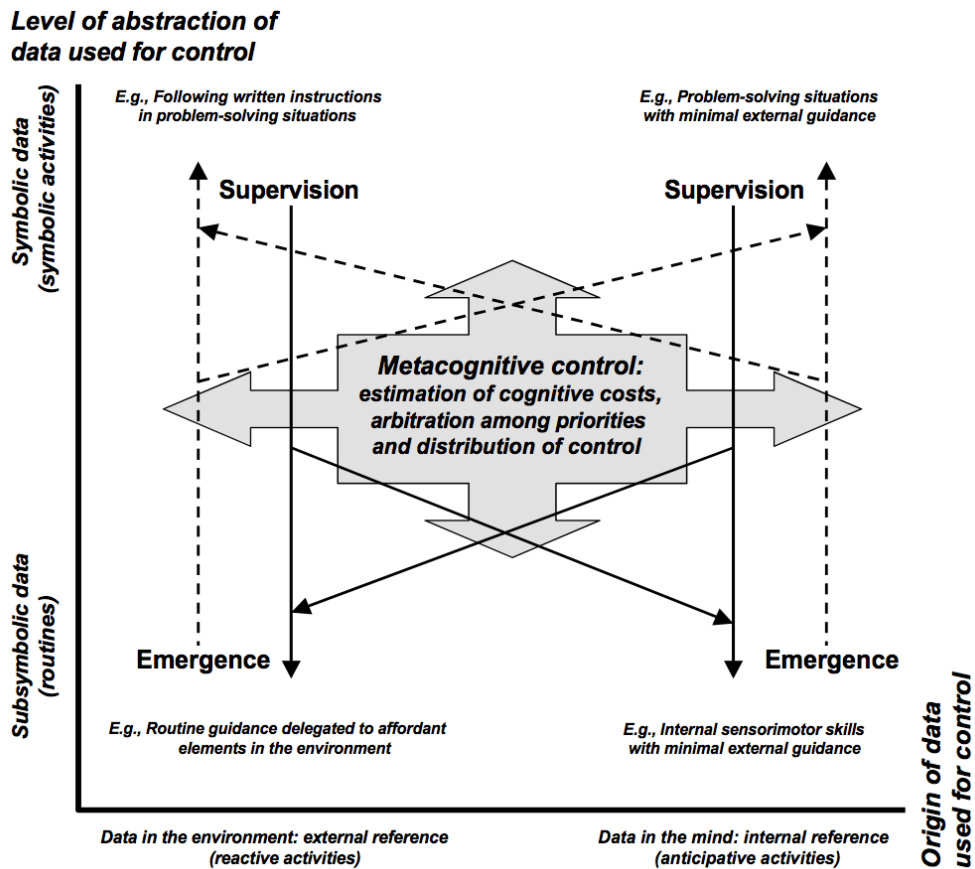


Figure 5 : Le modèle du contrôle cognitif de Hoc et Amalberti (2007)

Pour illustrer le croisement des deux dimensions du modèle, un certain nombre d'exemples sont fournis par les auteurs. Au niveau symbolique, une activité de résolution de problème s'appuyant sur des données externes correspondra à la mise en œuvre d'une série d'instructions écrites pour utiliser un nouvel outil, alors qu'une résolution de problème d'origine interne correspondra à la résolution d'un théorème, par exemple. Au contrôle subsymbolique externe, les auteurs associent la notion d'affordance (au sens de Norman, 1988, plus qu'à celui de Gibson, 1979), alors que le contrôle subsymbolique interne correspondrait à un contrôle sensorimoteur en boucle ouverte. L'exemple donné pour ce dernier point est celui de la manipulation du levier de vitesse qu'on ne regarde plus. On pourrait objecter à cet exemple que si un guidage visuel n'est plus nécessaire une fois la position du levier de vitesse mémorisée, sa manipulation continue à s'appuyer sur des retours sensoriels tactile et proprioceptif. Plus généralement, la pertinence de la distinction entre guidage externe/contrôle réactif et guidage interne/contrôle anticipatif ne me semble pas apporter une véritable plus-value dans la compréhension des mécanismes du contrôle cognitif. Je retiendrai plutôt la notion de compromis cognitif, c'est-à-dire le réglage de la nature du contrôle en fonction des exigences de la situation et des objectifs de l'individu pour atteindre une performance acceptable. Ce réglage repose sur les processus de supervision autant que sur les mécanismes d'émergence cognitive. Ce sont justement ces

mécanismes qui sont les moins connus et cruciaux pour la réalisation d'une activité dynamique complexe telle que la conduite automobile.

Quant à la distinction entre contrôle symbolique et contrôle subsymbolique, elle a le mérite de positionner les processus de contrôle sur un continuum en termes de niveau d'abstraction des données traitées. Ce faisant, elle décloisonne les trois niveaux proposés par Rasmussen (1983). En revanche, la notion de routine telle qu'elle est utilisée pour le contrôle subsymbolique maintient l'ambiguïté entre sensorimotricité et règles d'action automatisées déjà présente dans Rasmussen (1983). Cette ambiguïté est parfaitement résumée par cette citation de Darses, Hoc, & Chauvin (2004) : « Le niveau fondé sur les habiletés se traduit par la mise en œuvre, sans attention consciente, d'automatismes cognitifs (calcul mental, gestion routinière d'itinéraires, etc.) et de configuration d'actions automatisées et fortement intégrées (contrôle de la trajectoire, contrôle sensorimoteur de dispositifs téléopérés, etc.). » Ici sont regroupés sous la bannière de l'habileté ou de la routine des processus de traitement de l'information d'ordres différents qui ont en commun d'opérer essentiellement hors du champ de la conscience et de ne pas relever d'un mode de contrôle explicite. C'est cette ambiguïté qu'il conviendra de lever.

2.4 Les bases neuro-anatomiques du contrôle hiérarchique

Les modèles hiérarchiques présentés jusqu'ici ne sont qu'exceptionnellement mis en rapport avec les travaux sur les hiérarchies neurofonctionnelles mises en évidence dans le système nerveux central. Pourtant, ces travaux me semblent être très structurants pour la définition d'un modèle hiérarchique du conducteur.

Un certain nombre de travaux ont mis en évidence que l'axe rostro-caudal des lobes frontaux est organisé de façon hiérarchique, avec les régions frontales postérieures qui détermine le contrôle reposant sur des représentations d'actions immédiates et concrètes, alors que le cortex rostro-frontal est en charge d'un contrôle qui s'effectue sur un empan de temps plus long et sur la base de représentations abstraites (pour une synthèse, voir Badre 2008). Plusieurs formalisations théoriques ont été proposées pour rendre compte de ce gradient rostro-caudal. Le modèle de la cascade développé par Koechlin, Ody et Kouneiher (2003) est probablement le plus marquant. Il distingue quatre niveaux organisés de façon hiérarchique (Figure 6) :

- Le *contrôle sensoriel* est le niveau le plus bas. Il permet de sélectionner une réponse motrice sur la base d'entrées sensorielles. Les études en imagerie cérébrale fonctionnelle menées par Koechlin montrent qu'une simple tâche de jugement de couleur avec réponse par pression sur un parmi deux boutons n'implique que le cortex prémoteur sur l'axe rostro-caudal du cortex frontal.
- Le *contrôle contextuel* implique le cortex préfrontal postérieur et sélectionne des réponses motrices sur la base d'indices contextuels de l'environnement immédiat. Par exemple, si la tâche consiste à choisir parmi deux lettres sur la base d'un indice de couleur, les aires associées au contrôle contextuel s'activent.
- Si le même indice de couleur est associé à des réponses ou à des tâches qui varient au fil du temps, le *contrôle épisodique* est mis en jeu. Il s'appuie sur le cortex préfrontal dorso-latéral. La sélection de l'action se fait dans ce cas en fonction du contexte évalué sur une certaine fenêtre temporelle.

- Enfin, le dernier niveau, appelé *contrôle par ramification (branching control)*, impliquerait le cortex fronto-latéral polaire et sélectionnerait des représentations d'action en fonction d'indices contextuels situés dans le passé. Ce quatrième niveau intervient lorsque la réalisation d'une tâche doit être interrompu temporairement afin de réaliser une autre tâche, ce qui implique la définition d'un sous-but à la tâche en cours (Koechlin, Basso, Pietrini, Panzer, & Grafman, 1999).

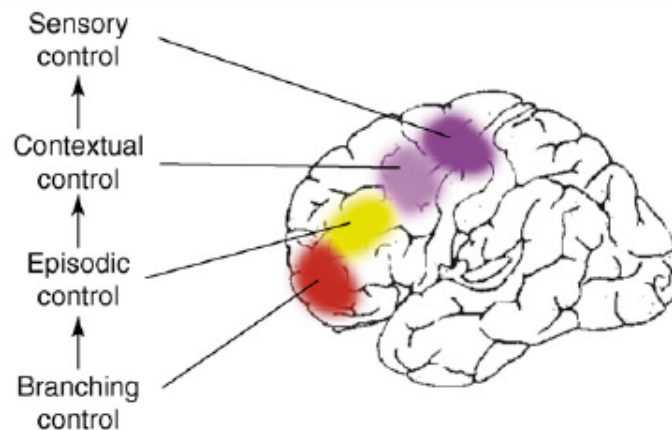


Figure 6 : L'organisation rostro-caudale des niveaux de contrôle cognitif selon le modèle de la cascade de Koechlin (tiré de Badre, 2008)

L'axe rostro-caudal du cortex frontal laisse donc apparaître la structure hiérarchique du contrôle cognitif. On constate une augmentation de la dynamique temporelle des processus impliqués plus on descend dans la hiérarchie. D'un point de vue fonctionnel, le niveau supérieur est seul en charge de la spécification des buts généraux et de la planification des actions sur le long terme, alors que le contrôle épisodique concerne davantage le diagnostic et l'organisation de la tâche en cours. Quant aux deux niveaux inférieurs qui traitent l'information immédiate, ils se distinguent par la prise en compte de la signification des indices de l'environnement (contrôle contextuel) par opposition à une association directe entre signal sensoriel et motricité (contrôle sensoriel).

Selon Fuster (2004), la hiérarchie des fonctions exécutives dans le lobe frontal telles que décrites par Koechlin et al. (2003) a son équivalent dans la partie postérieure du cerveau en charge du traitement de l'information sensorielle. Les deux systèmes, perceptif et exécutif, forment le cycle perception-action qui gouverne l'ensemble de nos comportements (Figure 7). Ainsi, l'information serait traitée de façon circulaire dans le système nerveux, et en particulier dans le cortex, à différents niveaux organisés de façon hiérarchique. Les actions fortement stéréotypées en réponse à des stimuli simples impliquent une boucle courte entre les aires sensorielles du cortex postérieur et les aires motrices du cortex antérieur, alors que les comportements plus complexes, guidés par des configurations d'information à la fois plus riches et plus intégrées dans le temps, impliqueraient les aires sensorielles associatives et les aires préfrontales. Cette hiérarchie est rendue possible notamment par les connexions cortico-corticales entre les aires sensorielles et exécutives de mêmes niveaux.

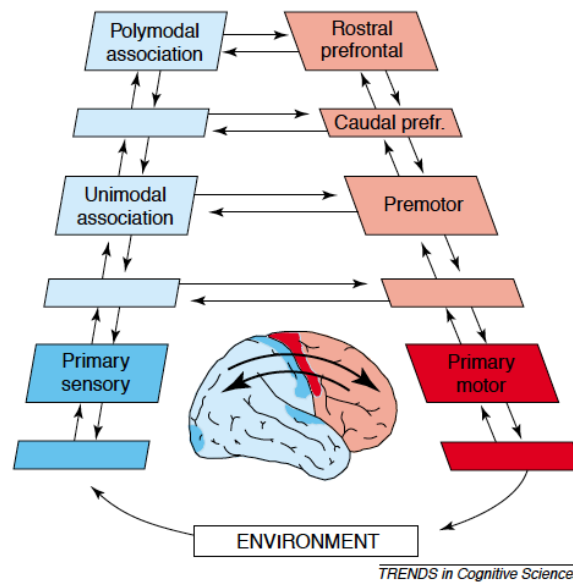


Figure 7 : Les bases corticales du cycle perception-action d'après Fuster (2004). En bleu, les fonctions perceptives ; en rouge, les fonctions exécutives.

Une question fondamentale soulignée par Badre (2008) est de savoir s'il y a une réelle distinction entre la dimension temporelle et le niveau d'abstraction du contrôle, ou si les deux sont intimement liés. Autrement dit, les différents niveaux de contrôle doivent-ils se concevoir comme des types de processus différents opérant sur des informations de nature différentes, ou cette vision des choses est-elle en fait artificielle ? Selon Kiebel, Daunizeau, & Friston (2008), le monde peut être modélisé comme une hiérarchie de systèmes dynamiques autonomes ayant des échelles de temps différentes. Cette hiérarchie temporelle de l'environnement se retrouverait au niveau du système nerveux central sous forme de hiérarchies anatomiques où les aires corticales de haut niveau encoderaient les changements d'états du monde les plus lents, alors que les structures primaires encoderaient les fluctuations rapides. Ils proposent d'ailleurs un modèle computationnel du gradient rostro-caudal selon lequel les dynamiques neuronales lentes intègrent les trajectoires des dynamiques neuronales plus rapides. Ici, le contrôle hiérarchique du comportement se conçoit comme un pur emboîtement de dynamiques temporelles. Je serai bien en mal de répondre à cette question dans le cadre de ce manuscrit, mais elle souligne l'impérieuse nécessité d'intégrer la dimension temporelle dans toute conception d'un modèle hiérarchique du contrôle du comportement.

Une autre ligne de travaux me semble pouvoir alimenter la réflexion sur la nature de la hiérarchie du traitement de l'information dans le système nerveux central. Ces travaux concernent spécifiquement la perception visuelle des objets de l'environnement. En effet, depuis les travaux de Hubel et Wiesel (1968), le système visuel était classiquement considéré comme un système hiérarchique de traitement de l'information qui part des cellules simples des aires visuelles primaires et qui projette vers des aires d'ordre supérieur répondant à des stimuli de plus en plus complexes. Pendant longtemps, la perception visuelle a donc été considérée comme un processus allant du détail à des représentations plus abstraites comme des catégories d'objets. Cette conception s'est vue remise en cause par un ensemble de travaux montrant par différentes méthodes, ayant en commun de présenter des images de façon très brèves, que l'humain était capable de catégoriser des objets dans des délais de l'ordre de 100 à 200 ms, avant même d'en percevoir les détails

(Thorpe, Fize, & Marlot, 1996). Hochstein et Ahissar (2002) proposent que cette capacité à saisir l'essence (*gist*) d'une image dépend d'un traitement *feedforward*, réalisé sur un mode implicite, et que l'accès à la conscience ne se fait que sur une approximation de premier ordre de l'objet. Les auteurs font également l'hypothèse d'un traitement hiérarchique inversé qui s'opère dans un second temps au travers des connexions descendantes des aires visuelles supérieures vers les aires visuelles primaires, ces feedback enrichissant la conscience des détails de l'objet (Figure 8). Il existe cependant un réel débat sur l'importance de ces influences descendantes, car elles semblent incompatibles avec les vitesses de traitement observées et que d'autres modèles purement *feedforward* peuvent rendre compte de la reconnaissance d'objet (Liu, Agam, Madsen, & Kreiman, 2009; VanRullen & Thorpe, 2002).

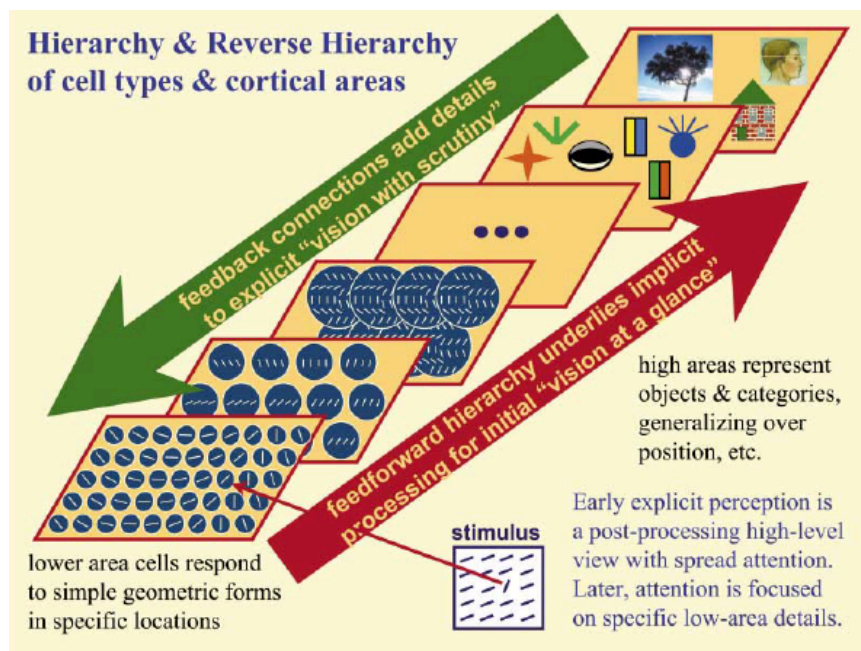


Figure 8 : Les hiérarchies directes et inversées de la perception visuelle selon Hochstein et Ahissar (2002).

Indépendamment de la question des circuits neuro-anatomiques impliqués et de leurs hiérarchies, il est surtout important de retenir qu'au niveau fonctionnel, la catégorisation des objets de l'environnement s'effectue par étape en commençant par une perception globale et implicite et que le traitement de la signification des objets dans leur contexte ne s'opère que dans un deuxième temps. Cette catégorisation ultra-rapide à la frontière de la conscience permettrait à l'organisme de s'adapter efficacement aux environnements dynamiques sur un mode de contrôle implicite, alors que les traitements d'ordre supérieur correspondraient à un niveau de contrôle explicite et plus lent. Il existerait donc dans le système visuel, pour une même fonction (la reconnaissance des objets), deux étapes fonctionnelles qui relèvent de l'implicite et de l'explicite.

2.2 Contrôle sensorimoteur et contrôle cognitif

La distinction fondamentale entre contrôle sensorimoteur et contrôle cognitif n'est pas nécessairement reprise dans les modèles hiérarchiques du contrôle du comportement. Selon moi, c'est justement l'absence de considération de cette distinction qui mène à une certaine forme d'ambiguïté sur la nature des processus qui opèrent au niveau opérationnel, au

niveau des habiletés ou encore au niveau subsymbolique, selon le type de modèle parmi ceux que nous avons considérés jusqu'ici.

Historiquement, la cognition et la sensorimotricité étaient deux objets d'étude répartis de chaque côté de la barrière disciplinaire existant entre, d'une part, la psychologie générale qui s'intéressait aux processus dits de haut niveau (perception, mémoire, langage, raisonnement) et, d'autre part, la neurophysiologie qui abordait les mécanismes de production des actions observables. Avec l'avènement des neurosciences au travers du développement de ses méthodes d'observation, cette frontière s'est peu à peu effacée et les deux disciplines se sont emparées de la difficile question des relations entre ce qui peut être considéré comme deux types de contrôle distincts, possiblement organisés de façon hiérarchique.

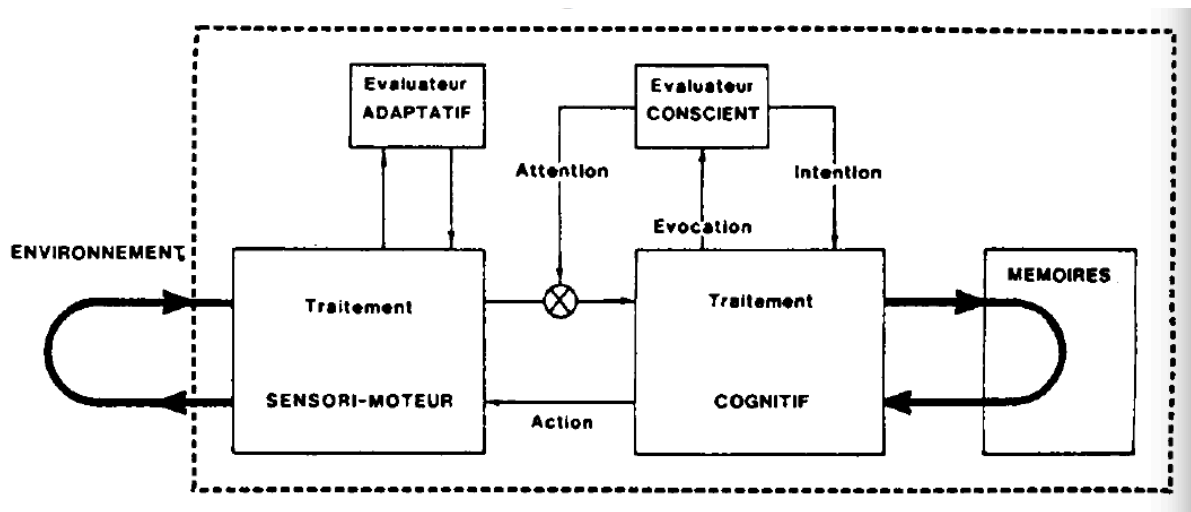


Figure 9 : La distinction entre les niveaux sensorimoteurs et cognitifs du contrôle de l'action selon Paillard (1984, 1985)

Une première façon de concevoir la distinction entre les deux types de processus serait de considérer la sensorimotricité comme l'ensemble des boucles externes qui mettent directement en rapport les informations de l'environnement et les productions motrices. Par opposition, on parlerait de processus cognitifs lorsqu'interviennent des représentations intériorisées du réel, stockées et évocables en mémoire. Cette distinction classique est celle sur laquelle s'appuie Paillard (1984, 1985), même s'il la juge lui-même simplificatrice (Figure 9). Le contrôle sensorimoteur se définirait donc par un bouclage direct des systèmes moteurs avec les flux d'information sensorielle. Ce niveau de contrôle n'aurait donc pas de mémoire à proprement parler, si ce n'est celle des processus adaptatifs qui entrent en jeu dans les apprentissages perceptivo-moteurs. Le contrôle cognitif opèrerait à partir de représentations stockées en mémoire et sur les informations qui remontent du niveau sensorimoteur au travers du filtre de l'attention. Il aurait deux sorties fonctionnelles, celles des programmes d'action qui s'adressent au système sensorimoteur et celles des programmes d'évocation, dirigé vers un évaluateur conscient, siège du contrôle de l'attention et des intentions. Ce faisant, Paillard (1984, 1985) positionne la conscience à la fois comme une propriété émergente du contrôle cognitif et comme le moteur de l'attention sélective. La planification de l'action se retrouve implicitement reléguée hors du champ de la conscience, entre la régulation du mouvement (qui relève à l'évidence du contrôle sensorimoteur) et les intentions, c'est-à-dire la planification des buts et des sous-buts nécessaires à la réalisation d'une tâche.

Le modèle de Paillard (1984, 1985) nous amène à considérer l'éventuelle dissociation entre les différents systèmes de mémoire impliqués dans le contrôle de l'activité. Depuis Tulving (1985), on distingue classiquement la mémoire procédurale, mémoire des savoir-faire, des mémoires déclaratives (sémantique et épisodique) ou mémoires des savoirs. La tentation pourrait être de faire correspondre cette distinction respectivement avec la mémoire de l'évaluateur adaptatif et avec le système de mémoire du contrôle cognitif. Cependant, la notion de mémoire procédurale renvoie autant aux adaptations sensorimotrices qu'à la mémoire implicite des connaissances relatives aux actions.

La théorie des modèles internes (Imamizu, Kuroda, Miyauchi, Yoshioka, & Kawato, 2003; Wolpert & Flanagan, 2010) me semble plus judicieusement adaptée à la problématique spécifique des apprentissages sensorimoteurs à proprement parler. Un modèle interne est la représentation au sein du système nerveux central d'une correspondance entre entrées et sorties pour un mouvement donné. Selon cette théorie, le contrôle moteur repose sur des modèles directs et des modèles inverses du mouvement. Les modèles inverses fournissent la commande motrice nécessaire pour accomplir un mouvement désiré ou atteindre un but. Les modèles directs prédisent la trajectoire d'un mouvement ou ses conséquences sensorielles à partir de la copie d'afférence d'un programme moteur en cours d'exécution. La combinaison d'un modèle inverse et d'un modèle direct permet de contourner un problème fondamental en neurophysiologie du contrôle moteur, celui des délais des retours d'information sensoriels qui rendrait tout mouvement rapide impossible. Le modèle direct, en prédisant les conséquences sensorielles de l'action en cours affranchi le système de ces délais. Les modèles directs seraient également nécessaires pour distinguer les réafférences, conséquences sensorielles résultant des actions du corps propre, des exafférences provenant de facteurs externes. La théorie des modèles internes implique l'intégration par le système nerveux central des propriétés dynamiques du système neuromusculaire et des objets de l'environnement, en particulier ceux avec lequel on interagit. Les invariants physiques de l'environnement, comme la gravité, sont donc nécessairement représentés. Autrement dit, les modèles internes serait la base de l'apprentissage sensorimoteur en fournissant au système la capacité de prédire les conséquences de ses actions sur lui-même ou sur son environnement.

Essentiellement développée par les théoriciens du contrôle moteur, la notion de modèle interne peut cependant se concevoir à des niveaux d'abstraction très différents : d'un niveau élémentaire comme la capacité à intégrer les propriétés dynamiques d'un outil au travers de sa manipulation (prévoir le comportement de mon volant) à des modèles mentaux de l'environnement (me construire une conscience de la situation pour prévoir le comportement des autres automobiliste). Selon une approche cybernétique, Pezzulo et Castelfranchi (2009) considèrent d'ailleurs que les modèles internes peuvent être organisés hiérarchiquement pour générer des prédictions à différents niveaux d'abstraction. C'est également l'idée défendue par Wolpert, Doya et Kawato (2003) qui proposent que les représentations symboliques ne sont que le résultat de boucles d'interaction organisées hiérarchiquement, chaque niveau s'appuyant sur des modèles internes directs et inverses, à l'instar du contrôle sensorimoteur. Cela reste toutefois une hypothèse très spéculative, car les arguments expérimentaux manquent pour la soutenir.

La question du niveau d'abstraction des modèles internes est particulièrement sensible dans le domaine de la modélisation du conducteur. On peut raisonnablement penser que les conducteurs acquièrent un ensemble de modèles internes des propriétés dynamiques de

leur véhicule. La fonction de ses modèles internes serait d'anticiper les comportements du véhicule en fonction des actions effectuées sur les commandes. Ils se construiraient lors de l'apprentissage initial puis au fil de l'expérience de conduite, avec une nécessaire mise à jour à chaque changement de véhicule. Une question encore ouverte est de savoir quel est le degré d'abstraction de ces modèles internes. La tentation peut être forte de simplifier la problématique de la modélisation du conducteur en incluant dans le modèle des modèles internes relativement complexes. Poussée à l'extrême, on pourrait résumer la modélisation du contrôle de trajectoire à une entrée (la courbure de la route) et un modèle inverse du véhicule, ce qui, convenons-en, ne ferait pas avancer la connaissance sur les processus sous-jacents à la réalisation de cette tâche. Or, faire l'hypothèse d'une capacité du conducteur à intégrer et anticiper l'ensemble des propriétés dynamiques d'un véhicule est irréaliste quand on considère leur complexité. D'ailleurs, les limites des capacités des conducteurs à prédire les conséquences de leurs actions sur le comportement du véhicule sont très bien illustrées par l'étude de Wallis, Chatziastros et Bülthoff (2002). Elle met en évidence la représentation erronée des séquences d'actions nécessaires pour un simple changement de voie. Cela témoigne du fait que les modèles internes de la dynamique du véhicule ne s'étendent probablement pas au-delà des propriétés mécaniques des commandes du véhicule.

Revenons à la question de la distinction entre contrôle sensorimoteur et contrôle cognitif. Par rapport à ses écrits antérieurs, Paillard (1991) pose la question de la dissociation entre sensorimotricité et cognition de façon différente en mettant l'accent sur la construction des référentiels spatiaux. Il distingue un mode sensorimoteur et un mode représentationnel du traitement de l'information spatiale. Les processus sensorimoteurs réalisent un dialogue direct avec le monde pour la construction d'un espace égo-centré vers lequel les actions sont dirigées. Ils sous-tendent la construction d'espaces sensorimoteurs locaux et spécifiques à la tâche en cours tels que l'espace céphalique pour coder la direction du regard, l'espace de pointage pour diriger la main dans l'espace, l'espace visuo-locomoteur pour le déplacement du sujet dans son environnement, l'espace de la main pour la manipulation et l'exploration des objets. La coordination des espaces locaux se ferait au sein d'un schéma corporel postural. Par opposition, le mode représentationnel s'appuierait sur des représentations de l'environnement construites et accessibles en mémoire. Ces représentations seraient codées sous forme abstraite ou symbolique dans un référentiel allocentrique, décentré de soi.

Le parallèle peut être facilement fait avec l'ensemble des travaux ayant montré une dissociation entre la fonction perceptive et la fonction motrice de la vision. Ungerleider et Mishkin (1982) furent les premiers à mettre en évidence chez le singe l'existence de deux voies anatomiques distinctes du traitement des informations visuelles. Suivirent une accumulation de travaux accréditant cette dissociation et précisant les structures cérébrales impliquées. Cela amena Goodale et Milner (1992) à associer deux voies corticales, la voie ventrale et la voie dorsale, à deux fonctions largement dissociées, celle du « quoi » et celle du « comment ». Les deux voies prennent toutes deux leurs origines dans les aires visuelles primaires. Elles ne se distinguent donc pas par les informations sensorielles qu'elles traitent mais par la nature des traitements qu'elles opèrent sur ces informations et, en conséquence, par les fonctions qu'elles sous-tendent. La voie ventrale transforme les entrées visuelles en un ensemble de représentations des caractéristiques stables des objets et de leurs relations spatiales, permettant leur identification et le raisonnement sur leur place dans le monde. Les objets y sont représentés dans un référentiel exocentrique. Par contraste, la voie dorsale sous-

tend le contrôle en ligne des actions dirigées vers un but, en transformant les entrées visuelles en coordonnées égocentrées pour les systèmes moteurs. La voie ventrale contribue à l'identification d'objets cibles et, ce faisant, fournit des éléments pour la planification de l'action, mais l'implémentation de l'action se fait uniquement au travers de la voie dorsale qui fournit les métriques nécessaires à la réalisation du mouvement. Souligner le parallélisme des deux systèmes représentait alors une rupture conceptuelle importante par rapport à l'idée encore largement répandue que la perception intervenait en préalable à l'action.

Par la suite, les arguments se sont accumulés pour illustrer la dissociation entre, d'une part, un mode de traitement de l'information qui supporte l'expérience sensible et consciente du monde et, d'autre part, des processus sensorimoteurs permettant la réalisation d'actions orientées vers un but. On trouve un certain nombre d'arguments expérimentaux, comme par exemple l'insensibilités de la voie dorsale à un certain nombre d'illusions perceptives (Ebbinghaus, Müller-Lyer, Roelofs, etc.). Typiquement, deux objets de même taille sont décrits par l'observateur comme de taille différentes, mais la spécification d'un mouvement vers ces mêmes objets, comme l'ouverture de la main lors d'une saisie, est identique (Aglioti, DeSouza, & Goodale, 1995). Cependant, ce sont les arguments neuropsychologiques qui sont les plus probants, comme la double dissociation entre agnosie des formes visuelles, due à une lésion du cortex temporal inférieur (voie ventrale), et ataxie optique, consécutive à une lésion du cortex pariétal postérieur (voie dorsale). Des patients ataxiques mis face à un orifice similaire à celui d'une boîte aux lettres sont capables de rapporter l'orientation de son ouverture, mais sont incapables d'y insérer une lettre, alors que des patients agnosiques se montrent incapables d'indiquer l'orientation de la fente, tout en gardant la capacité à y introduire une lettre. Un autre argument majeur pour la dissociation entre vision pour la perception et vision pour l'action réside dans ce qu'on appelle la vision aveugle, présente chez certains patients atteints d'une lésion de l'aire visuelle V1, incapable de détecter la présence d'un objet devant soi mais capable de pointer dans sa direction si on les pousse à le faire.

Il a également été montré des dissociations analogues entre perception et action dans d'autres modalités sensorielles que la vision, en particulier en ce qui concerne le système somatosensoriel (Dijkerman & de Haan, 2007). Anema et al. (2009), par exemple, mettent en évidence une double dissociation chez deux patients dont le sens tactile est intact, mais qui s'avèrent incapables de localiser une stimulation de la main selon la méthode qu'on leur demande d'utiliser. Le premier patient présente des difficultés à indiquer le point de stimulation sur le dessin d'une main, mais peut pointer de son autre main la stimulation. L'autre patient présente le profil inverse. Des cas similaires avaient été rapportés auparavant par Paillard et collaborateurs (Paillard et al., 1983; Paillard, 1999). Anema et al. (2009) reprennent d'ailleurs à leur compte la distinction discutée par Paillard (1999, 2005) et Gurfinkel et Levick (1991) entre schéma corporel et image du corps, deux représentations distinctes du corps au sein du système nerveux central. L'image du corps en tant que représentation explicite du corps comme objet est la base de la conscience corporelle, alors que le schéma corporel relève du contrôle sensorimoteur et intervient dans le contrôle de la posture et des mouvements dans l'espace.

L'accumulation de travaux illustrant la dichotomie proposée par Goodale et Milner (1992) fait de cette théorie une des pierres angulaires de la littérature sur la vision. Cependant, certaines observations contradictoires existent. En particulier, certains travaux

expérimentaux ont montré l'influence d'illusions perceptives supposées relever de la voie ventrale sur la réalisation de tâches motrices supposées, elles, relever de la voie dorsale. Cela pose la question de l'équivalence des tâches utilisées pour conclure à une dissociation entre perception et action. Cardoso-Leite et Gorea (2010) font une synthèse particulièrement bien documentée de ces éléments contradictoires et ils remettent en cause la dissociation entre voie ventrale et voie dorsale en termes de vision pour la perception et vision pour l'action, ainsi que le caractère nécessairement conscient ou inconscient associé aux deux types de processus. Parmi les arguments avancés, certains pointent vers l'idée que la dynamique temporelle des tâches et le niveau d'intégration de l'information pourraient être des facteurs déterminants dans les dissociations observées. Sans nier l'existence de processus différents sous-tendus par des substrats neuro-anatomiques distincts, Cardoso-Leite et Gorea (2010) considèrent donc que la dichotomie perception-action n'est pas nécessairement la meilleure façon de concevoir le problème.

A l'opposé de l'idée qu'il existe une dissociation entre perception et action, on trouve la théorie idéomotrice de James (1890) et ses résurgences contemporaines qui postulent que l'action est contrôlée par des représentations de leurs effets désirés, avec un codage commun des événements perceptifs et des plans d'action (Prinz, 1997). Le couplage fort entre perception et action, et surtout l'idée que les fonctions supérieures de la cognition s'appuient sur ce couplage, se sont développés dans le cadre de la cognition enracinée (*grounded cognition*, Barsalou, 1999, 2008) ou incarnée (*embodied cognition*, Shin, Proctor, & Capaldi, 2010; Wilson & Golonka, 2013; Wilson, 2002), ou encore de l'enactivisme (Rosch, Thompson, & Varela, 1992). On peut également citer la théorie sensorimotrice de O'Regan (2011) qui s'y apparente dans une certaine mesure. Ces approches plus ou moins superposables forment une nébuleuse théorique au sein de laquelle différents courants plus ou moins radicaux existent. Alors que les tenants les plus durs de l'enaction rejettent totalement les notions de modèle interne ou de représentation pour considérer la cognition comme un phénomène émergent de la dynamique d'interaction sensorimotrice entre le corps et l'environnement, d'autres parlent plus facilement de simulation interne. Cependant, ces auteurs ont en commun de rejeter l'idée que la connaissance est représentée en mémoire sous forme de symboles amodaux, traités de façon abstraite par des processus centraux. Au contraire, toute forme de cognition, y compris les formes les plus évoluées comme le raisonnement, le calcul numérique et le traitement du langage, s'appuierait sur les systèmes perceptivo-moteurs par la réactivation d'état perceptuels, moteurs ou introspectifs sous la forme de simulations modales ou multimodales (Barsalou, 2008). Une catégorie d'objet (par exemple, celle des chaises) ne serait pas représentée en mémoire sous formes de propriétés abstraites mais sous forme de représentations multimodales capturées par l'expérience (vision et contact avec la chaise, action de s'asseoir, sensation de confort ou de relaxation). La notion de simulation comme alternative au concept de représentation symbolique est donc centrale dans cette approche qui, selon Barsalou (2008), rend mieux compte des liens entre, d'une part, perception et action et, d'autre part, cognition supérieure. Ainsi, les habiletés sensorimotrices, cognitives et même sociales reposeraient sur les mêmes structures nerveuses (Barsalou, 2008). Cette théorie s'est d'ailleurs fortement appuyée sur la découverte des neurones miroirs. Ces neurones ou systèmes de neurones, présents dans les cortex prémoteurs et pariétaux notamment, s'activent lorsqu'un geste est effectivement réalisé, lorsqu'il est imaginé ou même lorsqu'il est observé chez autrui, ce qui représenterait la base de la compréhension des intentions

d'autrui, de l'apprentissage par imitation, et de l'empathie envers autrui (Rizzolatti & Craighero, 2004).

Les considérations théoriques qui précèdent nous interrogent sur la nature de la distinction entre sensorimotricité et cognition et sur la façon de la représenter dans un modèle général de l'articulation des niveaux de contrôle de l'activité. De fait, de nombreux arguments plaident pour une véritable dissociation fonctionnelle et structurelle entre les processus sensorimoteurs et les fonctions dites supérieures, mais la question fait encore largement débat. Il me semble difficile de trancher à l'heure actuelle entre les approches constructivistes et enactionnistes, car s'il est vrai qu'il n'existe aucune réelle preuve de que le système nerveux central génère des représentations symboliques amodales, la cognition enracinée manque encore largement de modèles computationnels bien spécifiés (Barsalou, 2010; Pezzulo et al., 2013). Par ailleurs, le débat se concentre surtout sur la nature des relations entre boucles sensorimotrices et perception du monde, avec d'un côté une position dissociationniste et de l'autre la conviction que la cognition est intimement liée à l'expérience du monde au travers des couplages perceptivo-moteurs. La question des déterminants de la prise de décision dans des situations dynamiques n'est pas centrale dans ce débat. Or, nombre de nos prises de décision sont réalisées sur un mode implicite.

A ce propos, Wolpert, Diedrichsen et Flanagan (2011) évoque une autre illustration de la possible distinction entre cognition et sensorimotricité, celui de la prise de risque. Dans la plupart des tâches où les choix en termes de risque sont exprimés de façon explicite, les individus prennent des décisions sous-optimales, en particulier lorsque le résultat est incertain. L'exemple du loto, où l'investissement financier a toutes les chances d'être à perte, est l'exemple le plus parlant, mais des phénomènes d'aversion au risque ou au contraire de recherche de risque peuvent être aisément reproduits expérimentalement en laboratoire. A l'opposé, dans une tâche de pointage vers un écran constitué de zones à plus ou moins grands gains ou pertes associés, les participants dirigent leurs mouvements vers la zone qui minimise les pertes pouvant être engendrées par l'imprécision du mouvement. La prise de risque associée à des décisions générées au niveau cognitif semble donc obéir à des déterminants différents que la gestion implicite des risques telle qu'elle peut être observée dans une tâche à dominante sensorimotrice.

2.5 Le cas de (la) conscience

Une problématique récurrente entrevue jusqu'ici est celle de la place de la conscience dans le contrôle de l'activité. La question n'est pas aisée, car elle renvoie à une littérature abondante et le concept même de conscience est particulièrement difficile à définir. La distinction que fait la langue anglaise entre *awareness* et *consciousness*, difficile à transposer en français, ne simplifie guère le problème. Pourtant, dans une démarche qui vise à préciser la distinction entre des niveaux de contrôle plus ou moins explicites, les questions de la place de la conscience, de ses conditions d'émergence et de ses effets dans le contrôle de l'activité, peuvent difficilement être contournées (Hommel, 2007).

Si on reprend la distinction entre processus cognitif et sensorimoteur, la position est relativement claire. La dissociation fonctionnelle entre mode sensorimoteur et mode représentationnel de Paillard (1991) ou encore celle entre vision pour la perception et vision pour l'action (Goodale & Milner, 1992), l'accès à la conscience est une des propriétés centrales des premiers termes. Cela dit, en réponse à un certain nombre d'objections sur ce

point, Milner et Goodale (2008) précisent que si la vision pour la perception est de nature consciente pour l'essentiel, elle inclut des représentations inconscientes (ou préconscientes) susceptibles de devenir accessibles à la conscience. Les mêmes structures cérébrales seraient impliquées dans les deux cas. En revanche, le traitement de l'information effectué par la voie dorsale pour la paramétrisation du mouvement échappe totalement à la conscience.

Si on considère la distinction entre processus automatiques et contrôlés (Schneider & Shiffrin, 1977) ou encore la notion de routinisation dans les modèles de contrôle cognitif (Hoc & Amalberti, 2007; Rasmussen, 1983), la place de la conscience dans l'articulation des niveaux de contrôle est moins évidente. L'automatisation/routinisation qui se met en place au fil de l'expérience s'accompagne d'une disparition progressive du contrôle de l'activité du champ de la conscience. Le lien entre ressources de traitement et conscience apparaît donc sans qu'on sache réellement dans quelle direction l'établir : la conscience est-elle un prérequis à l'allocation de ressources cognitives ou en est-elle la conséquence ? En d'autres termes, est-elle arbitre ou propriété émergente du traitement de l'information ?

Selon Baars (2002), la conscience est la condition (ou le témoin ?) de l'intégration au sein d'un espace de travail global de l'ensemble des traitements de l'information spécialisés et distribués au sein du système nerveux. A l'appui de cette théorie, il cite un ensemble important de travaux en imagerie cérébrale sur la conscience sensorielle ayant en commun d'avoir comparé le traitement d'une même information dans des conditions ayant permis une perception consciente ou pas. Systématiquement, la perception consciente a activé un réseau cortical étendu, impliquant la plupart du temps les cortex pariétaux et frontaux, alors que le traitement inconscient n'activait que les aires sensorielles.

Pour Hommel (2013), la conscience ne joue aucun rôle dans le contrôle du mouvement à proprement parler, ne serait-ce que parce que la génération d'une expérience consciente nécessite du temps, entre 300 et 500 ms, ce qui semble incompatible avec la réalisation de nombreuses tâches perceptivo-motrices du quotidien. La fonction de la conscience serait plutôt de permettre la création de représentations de ses propres actions qui soient communicables à autrui. Cette position s'accorde mal avec les travaux de Libet (1985). Au travers de l'étude des potentiels de préparation motrice, il montre que l'initiation d'un mouvement volontaire précède la conscience de vouloir exécuter le mouvement de 400 ms. En revanche, la conscience permet d'inhiber la réalisation de l'action dans les 150 ms environ avant son exécution. La conscience pourrait donc jouer un rôle d'arbitre pour autoriser ou inhiber la mise en œuvre motrice de l'intention d'action qui, elle-même, précède la conscience de vouloir agir. Une autre hypothèse que l'auteur n'exclue pas serait que la conscience déclencherait la mise en œuvre de ce qui est préparé au niveau moteur de façon anticipée et inconsciente. Ces résultats plaident pour situer l'accès à la conscience à la marge du contrôle sensorimoteur à un niveau de contrôle implicite.

Les défenseur de l'hypothèse dite de « suprématie sensorimotrice » font un lien direct entre l'organisation hiérarchique des traitements sensorimoteur et cognitif de l'information et l'accès à la conscience (Ansorge, Neumann, Becker, Kälberer, & Cruse, 2007). Selon cette théorie, les deux systèmes, sensorimoteur et cognitif, répondent à une différence fonctionnelle fondamentale. Les processus sensorimoteurs sous-tendent les comportements d'adaptation immédiate aux changements de l'environnement. Nombre de comportement indispensables à la survie en dépendent. Par opposition, la vision consciente aurait pour but de maintenir active l'image de ce qui a été vu au-delà même de la présence physique du

stimulus. Il s'agirait d'une capacité apparue plus récemment dans l'histoire de l'évolution. Cependant, la perception consciente s'appuierait sur le traitement sensorimoteur de l'information. Un des arguments majeurs avancé pour défendre cette position est que la stabilisation complète de l'image par asservissement de la position de l'image à l'orientation de l'œil tend à faire disparaître la perception consciente de l'image (Riggs, Ratliff, Cornsweet, & Cornsweet, 1953). L'exploration visuomotrice de l'environnement serait donc indispensable à l'entrée dans le champ de la conscience des objets qui le composent.

Ceci nous amène à une question cruciale, celle des conditions de l'émergence cognitive, et plus précisément dans quelle mesure et par quels mécanismes l'adaptation sensorimotrice détermine la détection consciente d'un événement. Knoblich et Kircher (2004) proposent des éléments de réponse en étudiant les conditions de l'accès au champ de conscience d'une perturbation du couplage visuomoteur. Ils font référence à de nombreux travaux ayant montré que nous sommes capables d'ajuster la production du mouvement à une modification des conséquences visuelles de l'action avant même d'en avoir conscience. Ce décalage serait le témoin du traitement différencié de l'information par les voies visuelles dorsale et ventrale, le traitement sensorimoteur étant plus rapide que le traitement sémantique. Ils avancent également un élément d'explication additionnelle en s'appuyant sur la théorie des modèles internes pour le contrôle moteur : ce serait l'écart entre les conséquences sensorielles prédites par le modèle direct et celles effectivement ressenties qui déterminerait la prise de conscience de la perturbation. Dans une tâche de dessin, Knoblich et Kircher (2004) ont manipulé la vitesse relative entre le mouvement réel des participants et ses conséquences visuelles. Ils montrent que le taux de détection de la perturbation est proportionnel à la vitesse initiale du mouvement, qu'elle est plus rapide quand elle donne lieu à une modification figurative (un changement de forme faisant intervenir la voie ventrale en charge de la reconnaissance de l'objet) et qu'elle peut être plus lente quand la perturbation, et la compensation qui va avec, sont progressives.

Cette courte synthèse portant sur le rôle de la conscience dans le contrôle de l'activité est loin d'être exhaustive, mais elle vise à pointer un certain nombre d'éléments. La fonction essentielle de la conscience est de permettre une activité réflexive sur la réalisation de la tâche en cours. Elle est la condition nécessaire à la compréhension des intentions d'autrui et à la communication de ses propres intentions. En cela, elle est nécessaire à la définition des buts généraux et à l'analyse explicite du contexte de l'activité. Le contrôle sensorimoteur opère en dehors du champ de la conscience. Entre le contrôle sensorimoteur et les niveaux de contrôle supérieur se situe un ensemble de processus qui relèvent du contrôle implicite et c'est à ce niveau que se situe la zone grise de la conscience avec un certain nombre de mécanismes encore mal connus qui, d'une part, déterminent l'accès à la conscience sur la base des remontées d'information du contrôle sensorimoteur et, d'autre part, modulent les conditions de réalisation de l'action en fonction du contexte. Dans la lignée de Knoblich et Kircher (2004), la théorie des modèles internes me semble offrir des pistes intéressantes pour expliquer les conditions de l'émergence cognitive. Quant aux travaux de Libet (1985), il me semblent particulièrement utiles pour spécifier la dynamique temporelle des processus de modulation et d'inhibition des intentions d'action à un niveau implicite.

2.6 Synthèse : définition d'un modèle hiérarchique du conducteur à quatre niveaux

Le travail de synthèse que j'ai conduit jusqu'ici m'amène à proposer un cadre conceptuel général sous la forme d'un modèle hiérarchique du conducteur. Plusieurs raisons motivent ce choix. Il s'agit tout d'abord de proposer une contribution théorique originale qui réponde à un certain nombre de questions en suspens, notamment en ce qui concerne l'articulation entre contrôle sensorimoteur, contrôle implicite et contrôle explicite. Il s'agit également de replacer mes travaux sur le contrôle de trajectoire et les moyens de l'assister dans un cadre de réflexion plus large. Ce faisant, la démarche devrait permettre d'identifier les aspects du problème de l'articulation des modes de contrôle qui sont les moins bien définis, et donc de guider les recherches futures. Enfin, l'enjeu est de fournir une grille de lecture des processus du traitement de l'information impliqués dans la conduite pour guider la conception de nouveaux systèmes interactifs.

Le modèle proposé, que je désignerai par l'acronyme SIES (pour Sensorimotor, Implicit, Explicit, Strategic control model), est représenté par la Figure 10. Il consiste en une formalisation du conducteur selon quatre niveaux de contrôle (partie gauche), qui sont mis en rapport avec différents types d'interfaces entre le véhicule et l'environnement (partie droite). Je vais maintenant en présenter la logique globale et en préciser les détails, tout en le positionnant par rapport aux modèles hiérarchiques existants.

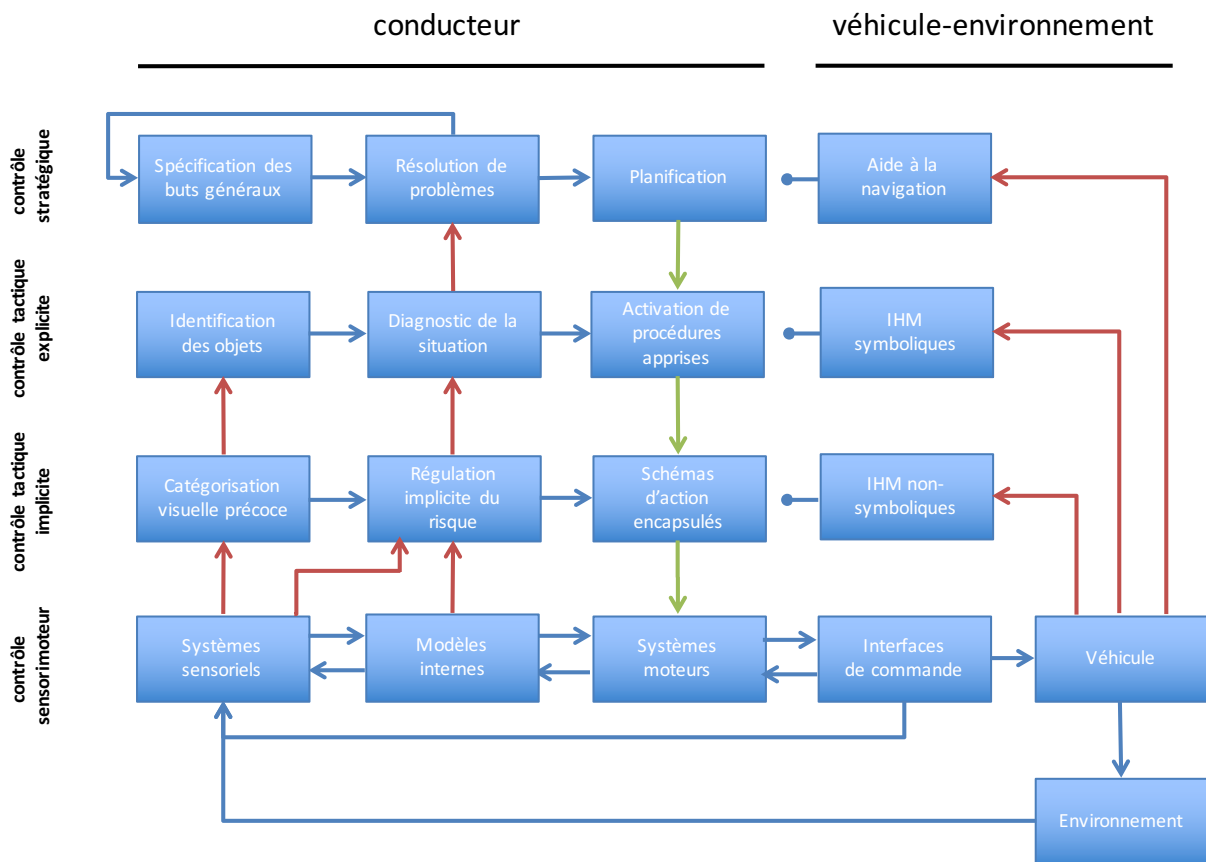


Figure 10 : Le modèle conceptuel SIES à 4 niveaux de contrôle

Au premier abord, on pourrait considérer qu'il s'agit d'une relecture du modèle SRK de Rasmussen (1983). En haut de la hiérarchie, on trouve le niveau du *contrôle stratégique* qui correspond peu ou prou au niveau des comportements contrôlés par des connaissances, appliqué à la conduite. Il est en charge de la recherche de solutions aux problèmes de planification du trajet en fonction des buts généraux. Au niveau inférieur se trouve le *contrôle tactique explicite* en charge du diagnostic de la situation en fonction de l'identification des objets de l'environnement. En fonction du diagnostic, le conducteur active la procédure qu'il juge adaptée à la situation, ce qui correspond à une prise de décision consciente et raisonnée. Ce niveau de contrôle correspond au niveau des comportements dirigés par des règles de Rasmussen (1983). Les deux modèles divergent quant à la formalisation des processus de contrôle inférieur. Le modèle SIES distingue deux niveaux. Le premier, le *contrôle tactique implicite*, correspond à un ensemble de processus de régulation du risque et de routines d'action encapsulées. Il représente aussi la capacité à catégoriser de façon précoce les éléments de l'environnement avant l'accès à la conscience. La régulation implicite du risque s'appuie en grande partie sur les remontées du niveau sensorimoteur. Quant à la notion d'encapsulation des schémas d'action, elle implique à la fois qu'il s'agit de procédures automatisées au fil de l'expérience et devenues plus difficiles d'accès à la conscience. Ces routines régulent la mise en œuvre de l'action par des processus d'inhibition et de modulation. Le *contrôle sensorimoteur* est en charge du bouclage entre les flux d'information sensorielle qui renseignent sur la dynamique du système véhicule-environnement et la production des actions sur les commandes.

La distinction entre contrôle tactique implicite et contrôle sensorimoteur lève donc l'ambiguïté présente chez Rasmussen (1983), mais aussi chez Michon (1985) ou encore Hoc et Amalberti (2007), qui regroupent les deux types de processus sous la bannière de l'automatisme ou du subsymbolique. Les processus de contrôle tactiques, implicite et explicite, ont en commun d'être de type procédural, c'est-à-dire qu'ils peuvent se modéliser comme des systèmes de règles. Cependant, les règles du niveau implicite de par leur encapsulation sont plus difficiles à verbaliser et beaucoup plus rapides dans leur mise en œuvre. On est clairement ici dans ce que j'ai décrit plus tôt comme la zone grise de la conscience où le risque est géré en fonction de marges de sécurité directement ancrées dans la dynamique d'interaction avec l'environnement par opposition à une évaluation rationnelle d'un danger potentiel. En cela, le modèle SIES se rapproche de celui de Salvucci (2006) qui représente au sein d'une architecture ACT-R deux niveaux d'ordre tactique, dont l'un correspond à une forme de traitement implicite de la situation.

Concernant le niveau sensorimoteur, le modèle accorde un rôle important aux modèles internes. Ils apparaissent indispensables pour rendre compte des capacités du conducteur à s'adapter aux réponses des actionneurs et du véhicule, tels qu'ils ont été conceptualisés dans les théories du contrôle moteur (Imamizu et al., 2003; Wolpert et al., 2011), mais aussi comme un des mécanismes sous-tendant la détection des perturbations au niveau sensorimoteur pour transmission aux niveaux tactiques. Je reprends en cela les conclusions de Knoblich et Kircher (2004). En cas de remontée jusqu'au niveau explicite, on reprendra le terme d'émergence cognitive proposé par Hoc et Amalberti (2007).

Au final, il me semble que le modèle SIES se superpose le mieux au modèle DiC de Hollnagel et collaborateurs (Hollnagel, 2006; Hollnagel et al., 2003, cf. Figure 2). Pourtant, le modèle DiC relève d'une approche systémique purement fonctionnelle en limitant la description des niveaux de contrôle aux buts et aux boucles temporelles de retour d'information. Par

opposition, le modèle SIES est un modèle structurel qui met l'accent sur la spécification des processus de traitement de l'information. Certes, les approches sont différentes, mais le niveau sensorimoteur me semble correspondre au niveau du tracking, le contrôle tactique implicite au celui de la régulation, le contrôle tactique explicite à celui de la supervision et le contrôle stratégique au niveau du ciblage. Par ailleurs, il me semble important de préciser que la hiérarchie SIES doit également être considérée comme une hiérarchie temporelle, chaque niveau ayant sa dynamique d'interaction avec l'environnement. Le contrôle sensorimoteur est par nature continu, les délais inhérents à la transmission d'information au sein du système nerveux étant au moins partiellement compensé par la construction de modèles internes des propriétés du système neuromusculaire et de l'environnement. Le contrôle tactique implicite se situe dans une boucle inférieure à la seconde, voire à 500ms, si on se réfère aux travaux de Libet (1985) ou Hommel (2013), par exemple. Le contrôle tactique explicite a une dynamique plus lente, déterminée par l'accès à la conscience, de l'ordre de la seconde à minima ou plus longue selon le type de procédure à mettre en œuvre. Le contrôle stratégique est lui potentiellement infini.

Par ailleurs, la hiérarchie du modèle SIES me semble cohérente avec l'organisation neurofonctionnelle du système nerveux central telle que décrite par Koechlin et al. (2003) pour les fonctions exécutives et, plus globalement, par Fuster (2004). Le contrôle sensorimoteur réalise un couplage direct entre perception et action, comme le contrôle sensoriel de Koechlin et al. (2003). Le contrôle tactique implicite permet la prise en compte du contexte immédiat pour moduler les réponses, comme le contrôle contextuel. Le contrôle tactique explicite, parce qu'il opère sur une échelle de temps plus longue en faisant appel à la mémoire des procédures acquises par le passé, correspond au contrôle épisodique. Enfin, le contrôle stratégique réalise la planification et la réactualisation des buts, comme le contrôle par ramification.

Les différents niveaux de contrôle correspondant à des processus de nature et de temporalité différentes, et donc in fine à des fonctions différentes, il paraît logique qu'ils soient associés à des solutions technologiques différentes pour les assister. Ceci est représentée dans la partie droite de la Figure 10. Assister le niveau stratégique consiste à développer des aides à la navigation. La problématique est donc spécifiquement de représenter au mieux les différentes alternatives au problème du choix du trajet et d'en faciliter la planification. Le contrôle tactique explicite peut s'appuyer sur des informations interprétées, la plupart du temps symboliques, facilitant le diagnostic de la situation (un voyant d'alerte, par exemple) ou suggérant la mise en œuvre d'une procédure. Alimenter le contrôle tactique implicite implique de fournir des indicateurs dynamiques, préférentiellement non-symboliques, qui n'ont pas vocation à être supervisés en continu. Il pourrait s'agir d'un signal modulé en fonction d'une variable de l'environnement. Au niveau sensorimoteur, c'est essentiellement au travers des commandes du véhicule que l'assistance peut être réalisée (quoique nous verrons dans la section 4 qu'une perception visuelle augmentée peut relever de ce niveau).

La suite du document va se recentrer sur la problématique du contrôle de trajectoire, qui a été mon objet d'étude privilégié ces dernières années. L'objectif dans le cadre de cette habilitation est avant tout d'en faire la synthèse. Cependant la question de l'articulation des niveaux de contrôle de l'activité s'est posée à de nombreuses reprises, tant en ce qui concerne la modélisation du conducteur que l'assistance à la conduite. Je vais donc tâcher au fil de la présentation des résultats, et surtout dans la section finale du manuscrit, de

mettre en lumière comment mes travaux s'inscrivent dans le cadre conceptuel que je viens de dresser et comment ils contribuent à le renseigner.

3. La modélisation du contrôle de la trajectoire

Cette section concerne la partie de mes travaux portant sur la compréhension des mécanismes qui déterminent le contrôle de trajectoire. Une grande part de ces mécanismes sont d'ordre sensorimoteur. Cependant, nous verrons que le contrôle tactique implicite intervient également, au niveau de la définition des enveloppes de trajectoire acceptable ou en ce qui concerne certaines prises d'information anticipatives.

La conduite automobile est une forme particulière de déplacement dans l'espace. Elle repose sur les mécanismes perceptifs et moteurs qui gouvernent la locomotion. Cependant, outre le fait que la conduite automobile implique un déplacement à des vitesses bien plus grandes que celles pour lesquels les systèmes sensorimoteurs ont évolué, la tâche présente des contraintes particulières. Pour atteindre une cible lointaine, un individu se déplaçant à pied mettra en place une stratégie consistant à aligner la direction de son déplacement avec la cible, ce qui génèrera une trajectoire linéaire (Warren & Fajen, 2004). Au contraire, un véhicule peut seulement adopter des trajectoires courbes. Les routes sont conçues pour être adaptées à cette contrainte et sont également limitées en largeur. Par conséquent, le conducteur doit non seulement suivre la courbure de la route, mais aussi garder une distance adéquate aux bords de voies. Cela dit, les marquages aux sols ne doivent pas être considérées uniquement comme des contraintes spatiales, car ils fournissent aussi des indices visuels utiles pour le contrôle latéral du mouvement. Ceci est particulièrement évident en conduite de nuit où la délimitation des bords de voies est une source d'information majeure. Ces particularités expliquent au final pourquoi il est nécessaire de développer des modèles du contrôle du déplacement qui soient spécifiques à la tâche de conduite.

3.1 Le contrôle visuel de la trajectoire

La conduite, comme la plupart des activités humaines, repose majoritairement sur la vision (Sivak, 1996), même si, nous le verrons ensuite, la contribution des autres modalités sensorielles est loin d'être négligeable. L'objectif des travaux présentés dans la section 3.1 est de contribuer à une meilleure compréhension du rôle des prises d'information visuelle dans le contrôle de la trajectoire en virage.

3.1.1 Un contrôle visuel à deux niveaux

Il est assez largement admis depuis Donges (1978) que le contrôle de la trajectoire repose sur deux processus complémentaires alimentés par des informations visuelles distinctes (Donges, 1978; Land & Horwood, 1995; Salvucci & Gray, 2004). Le premier est en charge de compenser les erreurs de positionnement latéral du véhicule et repose principalement sur la vision proche de la route (environ 7° sous l'horizon, soit 6-10 m à l'avant du véhicule), en particulier sur la perception des bords de voie en vision périphérique (Summala, Nieminen, & Punto, 1996). Le second utilise en entrée des informations visuelles plus lointaines pour anticiper les changements de courbure de la route. Les deux processus, compensatoire et anticipatif, se combinent pour former une intention d'action, assimilable à une consigne

d'angle au volant, que le système moteur serait en charge de convertir en un couple appliqué à l'actionneur (nous reviendrons sur ce point en particulier dans la section 3.3). Plusieurs modèles récents reprennent ce principe général d'un contrôle visuel à deux niveaux, mais différent dans leurs mises en œuvre (Steen, Damveld, Happee, Van Paassen, & Mulder, 2011; Plöchl & Edelmann, 2007).

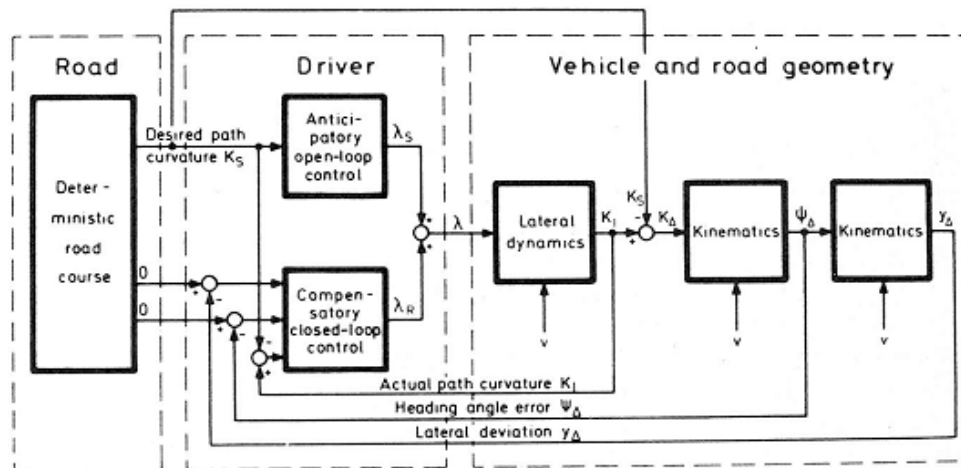


Figure 11 : Le contrôle trajectoire à deux niveaux selon Donges (1978).

L'hypothèse initialement proposée par Donges (1978) a vu sa plus belle démonstration expérimentale réalisée par Land et Horwood (1995). L'expérience consistait à ne fournir au conducteur qu'une section horizontale de la route de 1° d'angle visuelle en hauteur pendant la négociation de virages. Quand seule la partie distante de la route était visible, la courbure de la route était globalement respectée et la conduite souple, mais des écarts conséquents par rapport au centre de la voie étaient observés. Au contraire, lorsque seule la partie proche de la route était disponible, le conducteur réussissait à maintenir son véhicule au centre de sa voie, mais la trajectoire était beaucoup plus instable, le conducteur oscillant rapidement dans la voie. D'après Cloete et Wallis (2011), cette démonstration est sujette à caution, car la faible fréquence de rafraîchissement du simulateur utilisé par Land et Horwood (7 Hz) pourrait avoir introduit des délais entre l'action sur le volant et le feedback visuel susceptible de générer les instabilités observées. Cependant, l'hypothèse d'un contrôle visuel à deux niveaux est soutenue par de nombreux résultats expérimentaux avec des tentatives de modélisation réussies (Salvucci & Gray, 2004). En outre, des études récentes en neuroimagerie accréditent cette distinction, avec un rôle central du complexe temporel MT+ dans la compensation et du cortex pariétal supérieur dans l'anticipation (Billington, Field, Wilkie, & Wann, 2010; Billington, Wilkie, & Wann, 2013).

Ce que ces résultats obtenus à l'aide d'occultation de la scène de conduite ne permettent pas d'établir, en revanche, c'est la robustesse des deux processus du contrôle visuel de la trajectoire. Autrement dit, comment l'anticipation et la compensation sont-elles affectées par une dégradation partielle des entrées visuelles telle qu'on peut la rencontrer dans des conditions de visibilité réduite, brouillard ou pluie intense par exemple ? C'est ce que nous avons cherché à déterminer à l'aide d'une technique de masquage partielle de la scène visuelle (Frissen & Mars, 2014). Pour cela, nous avons analysé les performances de conduite dans une condition contrôle (visibilité parfaite) et 14 conditions expérimentales en faisant varier la position et l'étendue d'un masque appliqué sur la scène visuelle (moitié supérieur

de l'écran, moitié inférieure ou écran complet) et son opacité (de 20% à 100%, à l'exception de la condition 100% sur écran complet, bien évidemment ; Figure 12).

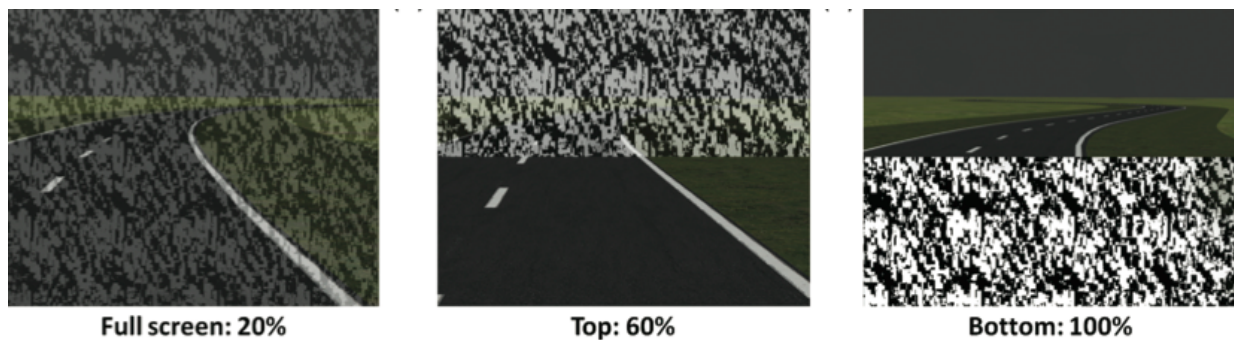


Figure 12 : Exemples de masques appliqués à la scène visuelle dans Frissen et Mars (2014). A gauche, masquage complet à 20% d'opacité ; au centre, masquage de la vision lointaine à 60% ; à droite, masquage de la vision proche à 100%.

Les résultats montrent qu'avec le masque en position haute (dégradation de la vision lointaine), le contrôle de la trajectoire reste relativement stable jusqu'à 60% d'opacité. Au-delà, des erreurs de positionnement latéral de plus en plus importantes sont observées (dans le sens d'une sous-compensation des changements de courbure de la route), avec un contrôle volant de plus en plus erratique, suggérant une capacité de plus en plus réduite à anticiper (Figure 13). Il semble donc qu'avec la diminution de la fiabilité des informations visuelles lointaines s'opère une transition vers un contrôle de plus en plus réactif, jusqu'à un certain point où la compensation en ligne des erreurs de positionnement ne suffit plus. A noter qu'on retrouve l'instabilité rapportée par Land et Horwood (1995) en situation d'occlusion complète de la vision lointaine alors que la fréquence de rafraîchissement des informations visuelles était de 50 Hz, ce qui tend à invalider la critique formulée par Cloete et Wallis (2011).

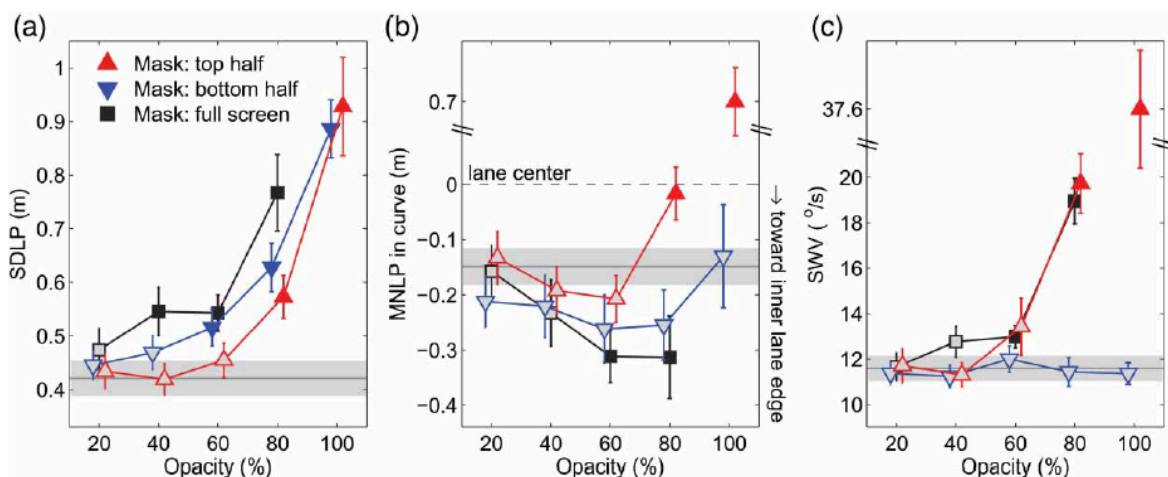


Figure 13 : Effets de la dégradation des entrées visuelles rapportés dans Frissen et Mars (2014). (a) écart type de l'écart latéral; (b) position latérale moyenne (une valeur négative correspond à un virage coupé, alors qu'une valeur positive traduit une sous-compensation de la courbure du virage); (c) vitesse moyenne de rotation du volant. Les barres d'erreur représentent les erreurs types. La bande grisée représente la condition contrôle (visibilité complète). Les marqueurs pleins correspondent à des différences statistiquement significatives par rapport à la condition contrôle.

Par comparaison, la conduite semble plus robuste à la dégradation des entrées visuelles proches. Si la variabilité du positionnement latéral augmente bel et bien de façon progressive, le contrôle volant reste remarquablement stable. Le positionnement moyen ne diffère pas non plus significativement, malgré une légère tendance à davantage couper les virages. Cette tendance disparaît d'ailleurs lorsque l'opacité est complète, en raison d'une plus grande variabilité interindividuelle.

Enfin, comme on pouvait s'y attendre, le masque complet détériore davantage la conduite que chacun des masques partiels pris isolément. Cependant, les résultats observés avec le masque complet ne peuvent pas s'expliquer comme la simple addition des effets des masques partiels. En particulier, il apparaît que les conducteurs se sont entièrement reposés sur la vision proche lorsque seule la vision lointaine était dégradée, alors qu'avec un masque complet (et pour les mêmes conditions d'opacité) l'information visuelle lointaine continuait à être utilisée. Cette flexibilité dans l'usage des informations visuelles s'accorde avec l'idée que le système nerveux central modifie la pondération entre indices sensoriels en fonction de leur fiabilité relative (Wolpert et al., 2011; Yuille & Kersten, 2006).

3.1.2 Déterminants optiques, visuomoteurs et cognitifs de l'anticipation visuelle

Ce que le modèle de Donges (1978) ne précise pas, c'est la nature des informations visuelles qui alimentent l'anticipation des changements de courbure de la route. Il y est décrit que le conducteur extrait de la route en amont une courbure de trajectoire « désirée ». De fait, dans nombres de modèles du conducteur d'inspiration cybernétique, l'anticipation se résume à un module dit « cognitif » qui fournit la géométrie de la route comme entrée à des processus de contrôle de l'action sans faire aucune hypothèse sur la façon dont cette géométrie est obtenue (Plöchl & Edelman, 2007). C'est justement à ces processus de traitement des informations visuelles anticipatives auxquels nous allons maintenant nous intéresser.

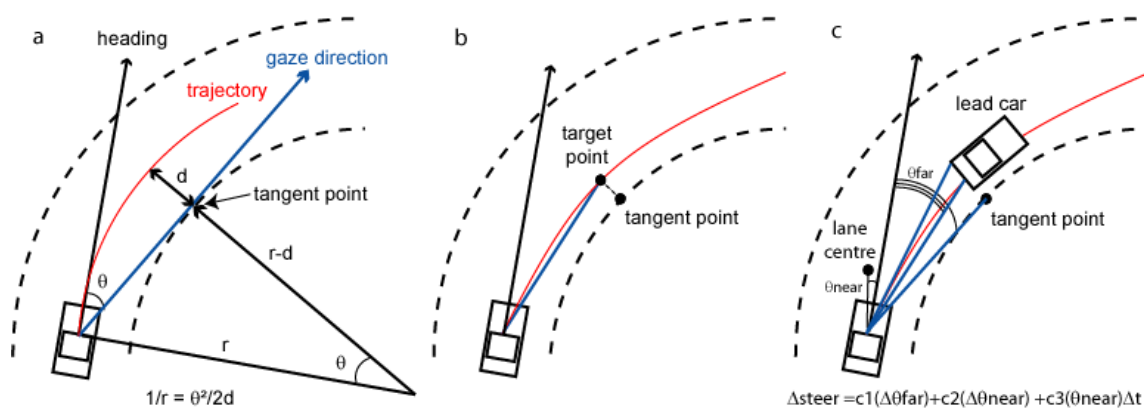


Figure 14 : L'utilisation du point tangent selon (a) Land et Lee (1994), (b) Boer (1998), et (c) Salvucci & Gray (2004).

Une avancée importante sur la question des stratégies de prises d'information pour anticiper la trajectoire a été apportée par Land et Lee (1994). A l'aide de mesures oculométriques réalisée sur une route sinueuse, les auteurs ont mis en évidence un point particulier du bord intérieur de la route auquel le conducteur se rapporte fréquemment lors de la négociation des virages. Il s'agit du point de tangence entre la direction du regard et le

bord intérieur de la voie de circulation (Figure 14). Ce point, qu'ils nomment donc le point tangent, correspond au point où la courbure de l'intérieur de la courbe s'inverse du point de vue du conducteur (Figure 16), ce qui en fait un point saillant, facile à isoler dans la scène visuelle. En outre, l'angle qui sépare la direction du point tangent et la direction du déplacement a une relation géométrique particulière avec la courbure de la route (Figure 14a). L'évolution de l'angle au point tangent pourrait donc être utilisée pour estimer les changements de courbure de la route, sans avoir à effectuer de jugement de distance absolue (Land, 1998, 2001). C'est pourquoi suivre les déplacements latéraux du point tangent pourrait fournir une lecture dynamique de la courbure de la route qui serait utilisée directement comme entrée pour le système moteur qui contrôle la direction du véhicule. Le suivi du point tangent serait donc l'expression dans la tâche de conduite du caractère proactif du regard tel qu'on peut l'observer dans nombres de tâches visuo-manuelles, comme la manipulation d'objets, le dessin, le piano ou encore certaines activités sportives (Hayhoe & Rothkopf, 2011; Johansson, Westling, Backstrom, & Flanagan, 2001; Land, 2006, 2009). L'œil va chercher dans l'environnement des informations pour guider l'action, non seulement pour extraire de la connaissance sur l'objet regardé (aucune dans le cas du point tangent), mais aussi car l'information extra-rétinienne générée par le mouvements des yeux (proprioception oculaire et copie d'efférence de la commande motrice) et l'estimation prédictive de ce mouvement (fondée sur un modèle interne de la dynamique oculaire) peut être utilisée par des systèmes moteurs distaux (Bekkering & Sailer, 2002; Miall & Reckess, 2002). Land et Lee (1994) rapportent ainsi un couplage très fort entre mouvements des yeux et rotations du volant, avec un décalage de l'ordre de 800 ms.

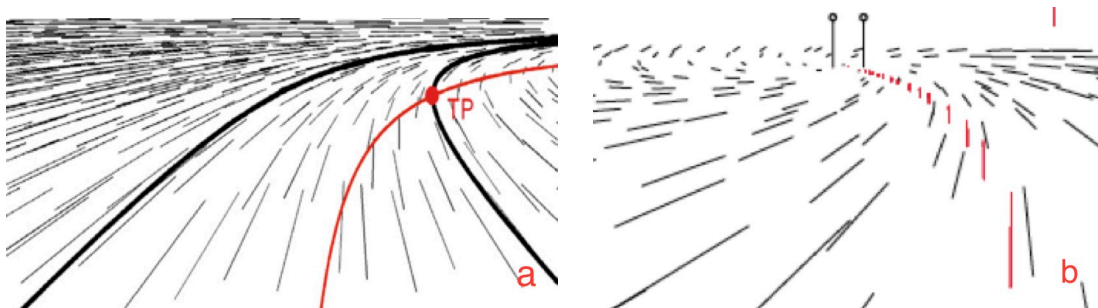


Figure 15 : L'utilisation du flux optique selon (a) Authié et Mestre (2012) et (b) Wann et Swapp (2000).

Le point tangent correspondrait aussi à un point singulier dans le flux optique, puisqu'il se situe à l'intersection entre le bord de voie intérieur et de la ligne d'inversion de la vitesse horizontale du flux (Figure 15a). Autrement dit, il s'agit d'un minimum local de défilement dans le flux optique global. Deux conséquences à cela. Premièrement, il s'agit d'un point propice à être une position de repos pour le regard, même s'il a été montré qu'à haute vitesse un nystagmus optocinétique peut être déclenché par le flux lors de phases de suivi du point tangent (Authié & Mestre, 2011). Deuxièmement, et plus crucialement, Authié et Mestre (2012) ont montré que les seuils de détection des variations de trajectoire sont les plus faibles lorsque le regard est dirigé vers la région du point tangent. Au-delà de la dynamique oculomotrice qu'il engendre, le suivi du point tangent pourrait donc correspondre à la recherche d'une zone de sensibilité maximale dans le flux visuel pour contrôler finement les actions à réaliser sur le volant.

La publication de l'article de Land et Lee (1994) dans *Nature* a été le point de départ de nombreux travaux sur le contrôle visuel de la trajectoire. Si plusieurs études confortent l'idée d'un recours au point tangent (Kandil, Rotter, & Lappe, 2009, 2010; Marple-Horvat et

al., 2005; Panerai, Toffin, Paille, Kemeny, & Fadel, 2007), certains auteurs proposent des modèles différents pour expliquer son utilisation (Figure 14), voire remettent en question la réalité de cette stratégie visuelle.

Boer (1996) propose un modèle qui, tout en mettant l'accent sur le point tangent, se distingue de Land (1998, 2001) par le fait qu'il ne repose sur aucune hypothèse concernant l'estimation, même implicite, de la courbure du virage abordé. Il repose au contraire sur le calcul d'une trajectoire optimale à partir de la distance et de la direction d'un point cible, proche du point tangent mais situé sur la trajectoire à adopter. La position latérale du point cible dépend de la distance au point tangent : elle se situe au milieu de la route si le point tangent est à plus de 30 m en amont du véhicule, à 75 cm du bord de voie environ si le point tangent est à moins de 20 m, ou à une distance intermédiaire entre 20 et 30 m. Le point fort de ce modèle, contrairement à celui de Land et collaborateurs, est de rendre compte du fait que la trajectoire adoptée minimise les accélérations latérales qui s'exercent sur le véhicule, une stratégie qui est effectivement mise en place par la plupart des conducteurs (Reymond, Kemeny, Droulez, & Berthoz, 2001). Selon ce modèle, la meilleure stratégie oculomotrice n'est donc pas de regarder le point tangent, mais plutôt des points de contrôle le long de la trajectoire future : le conducteur regarde où il souhaite voir passer son véhicule en redressant le virage au maximum.

Wilkie, Wann et collaborateurs (Wilkie, Wann, & Allison, 2008; Wilkie & Wann, 2003) défendent également l'idée que les conducteurs regardent le long de la trajectoire future, tout en mettant en doute le recours au point tangent. Leur modèle, dit du regard actif, suppose que les yeux sont dirigés là où le véhicule doit passer, une à deux secondes en amont de la position actuelle. Chaque point de fixation fournirait un ensemble d'informations rétiniennes et extra-rétiniennes qui alimenteraient une loi de contrôle du volant. Parmi les informations rétiniennes, le flux optique jouerait un rôle, le bénéfice de regarder les points de passage futurs ayant également été formalisé (Figure 15b). En effet, si le regard est dirigé vers un point cible et que la trajectoire pour atteindre ce point est correcte, le flux optique le long de la trajectoire future serait parallèle à la direction du déplacement. En revanche, en cas d'erreur de contrôle, la courbure du flux renseignerait directement sur la correction à apporter (Kim & Turvey, 1999; Wann & Swapp, 2000). Selon cette théorie, le regard ne serait dirigé vers le point tangent que parce les conducteurs privilégient des trajectoires qui coupent le virage. Le regard se trouverait donc mécaniquement positionné dans la région du point tangent, ce qui ferait de la stratégie point tangent un pur artefact expérimental. A l'appui de cette idée, Wilkie, Kountouriotis, Merat, & Wann (2010) ont manipulé la consigne donnée au conducteur en leur demandant soit de conduire à une distance fixe du bord de voie intérieur, soit de couper les virages. Ils constatent l'absence de recours au point tangent dans le premier cas et concluent que les fixations qui semblent être dirigées vers le point tangent ne le sont que parce que la trajectoire visée s'en rapproche. Cependant, la démonstration a ses limites, car demander à rouler au centre de la voie ou à une autre distance fixe du bord de voie revient à transformer la tâche de conduite d'une tâche de gestion d'un espace latéral à une tâche de réduction d'erreur. Il s'agit là d'un biais expérimental potentiellement aussi déterminant que le biais d'analyse décrit par Wilkie et collaborateurs.

Sans faire aucune hypothèse sur l'utilisation du flux optique ou l'estimation de courbure de virage ou de trajectoire, Salvucci et Gray (2004) proposent quant à eux une évolution à la fois simple et élégante du modèle de Donges (1978). Le modèle repose sur la perception de

deux points distincts : un point proche (le centre de la voie à peu de distance du véhicule) et un point lointain, qui peut être le point de fuite en ligne droite, le point tangent en virage ou un véhicule en amont, selon les circonstances. Le modèle, formalisé par un contrôleur à action proportionnelle-intégrale, contrôle la trajectoire en minimisant les variations de direction des points proches et lointains, tout en gardant la direction du centre de la voie proche de zéro par rapport à l'axe du véhicule. L'action conjointe des deux actions assure la stabilité de la trajectoire (point lointain) et le maintien du véhicule au centre de la voie (point proche). Une différence fondamentale par rapport à Donges (1978) est que l'anticipation est ici une boucle fermée et non pas une prédiction de la courbure de la route. La force du modèle est qu'il rend compte de plusieurs classes de comportement (négociation de courbe, correction de trajectoire après perturbation et changement volontaire de voie) par un même ensemble de mécanismes opérant sur des signaux simples (la direction de deux points). L'ajustement des paramètres du modèle permet aussi de rendre compte de certaines différences interindividuelles. Selon ce modèle, la direction du point tangent est un paramètre d'entrée possible et particulièrement adapté à la prise de virage de par le fait qu'il s'agit d'un point saillant de la scène visuelle. Cependant, tout autre point qui évolue selon la géométrie de la route peut jouer le même rôle.

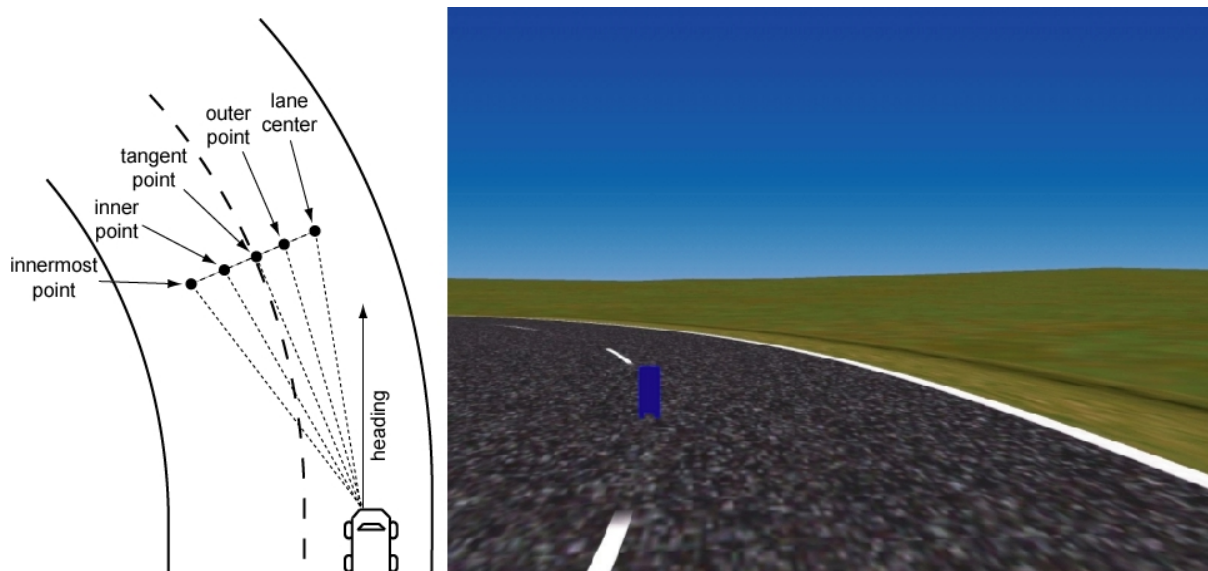


Figure 16 : A gauche : Positions des 5 points de fixation dans Mars (2008a). A droite : Image montrant la balise de fixation située sur le point tangent pendant un virage à gauche.

Afin de contribuer à l'étude du rôle du point tangent dans le contrôle de la trajectoire, une expérience a consisté à manipuler l'orientation du regard des conducteurs par l'intermédiaire d'une tâche de suivi de cible (Mars, 2008a). Les participants devaient conduire en fixant un point cible situé sur le point tangent, ou à proximité mais décalé latéralement (Figure 16). Le point cible apparaissait en amont du véhicule 50 m avant d'aborder les virages et pendant leur négociation. Le point cible le plus excentré vers le bord extérieur du virage correspondait au centre de la voie de circulation. Le point situé entre le centre de la voie de circulation et le point tangent se rapprochait d'avantage d'une trajectoire coupant le virage. Les points situés à l'opposé du point tangent indiquaient des positions plus ou moins excentrées vers l'intérieur du virage, sur la voie de circulation opposée (virages à gauche) ou sur le bas-côté (virage à droite). Les effets de l'orientation du regard sur plusieurs indicateurs de la conduite (vitesse, moyenne et variabilité de position latérale, nombre d'inversions au volant) ont été analysés et comparés à une condition

contrôle où l'exploration de la scène visuelle était laissée libre. La logique sous-jacente à cette manipulation expérimentale était que plus la position du regard serait éloignée du positionnement supposé le meilleur pour le contrôle de la direction, plus les performances de conduite seraient altérées. Selon le modèle du point tangent stricto-sensu (Land et Lee, 1994), tout décalage par rapport au point tangent, dans un sens ou dans l'autre devrait donner lieu à des performances de conduite moindres et éventuellement provoquer un écart (symétrique ?) par rapport à la trajectoire de référence. Selon les modèles qui défendent l'idée que la meilleure stratégie visuo-motrice consiste à regarder la trajectoire future (Boer, 1996; Wilkie et al., 2008), regarder constamment le point tangent ou hors de la voie de circulation devrait être particulièrement perturbateur. Enfin, selon Salvucci et Gray (2004), le suivi de n'importe quel point cible qui suit la courbure de la route permettrait d'anticiper la courbure du virage et d'adopter une trajectoire correcte.

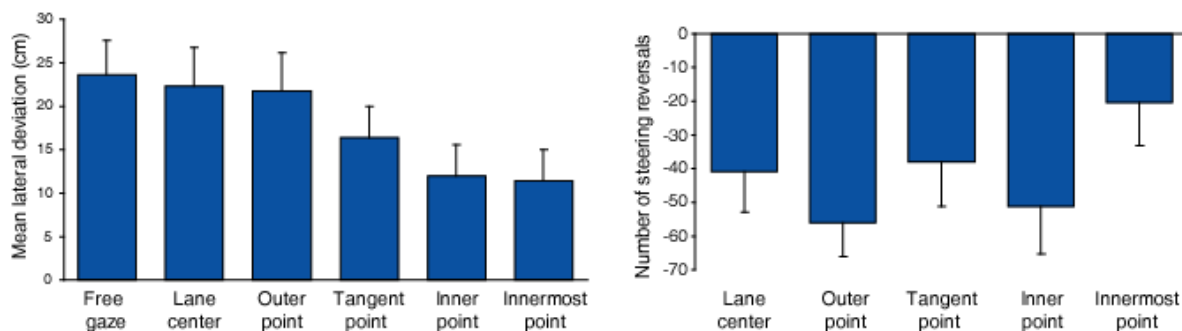


Figure 17 : Résultats principaux rapportés dans Mars (2008a). A gauche, l'écart latéral moyen, une valeur positive représentant une tendance à couper les virages : lorsque le regard est dirigé sur la route (lane center et outer point), le conducteur coupe le virage comme dans la condition contrôle (free gaze) ; dans les autres conditions, la position latérale est significativement déviée controlatéralement à la déviation du regard. A droite, la diminution du nombre d'inversions au volant est significative dans toutes les conditions, sauf celle où la cible est la plus à l'intérieur du virage.

Indépendamment du modèle de contrôle de trajectoire considéré, certains travaux laissent penser qu'une stratégie d'exploration laissée à la liberté du conducteur donne lieu à de meilleures performances de conduite qu'une stratégie contrainte (Marple-Horvat et al., 2005; Wilkie & Wann, 2003). Wilkie et Wann (2003), par exemple, montrent que contraindre le conducteur à regarder au centre de la voie perturbe bien moins le contrôle du véhicule qu'un point de fixation qui ne suit pas la géométrie de la route, mais donne tout de même lieu à des performances dégradées par rapport à une exploration visuelle libre. Les résultats rapportés dans Mars (2008a) contredisent cette idée, puisqu'une amélioration de la stabilité du contrôle a été observée en situation de regard contraint, que ce soit au niveau de la trajectoire (diminution de la variabilité de l'écart latéral) ou au niveau de l'action sur l'organe de commande (diminution du nombre d'oscillation du volant ; Figure 17, droite). Cette amélioration est observée quelle que soit la position latérale de la cible par rapport au point tangent, même si l'effet est réduit dans la position la plus extrême, lorsque la cible est décalée de façon importante dans la voie de circulation opposée ou sur le bas-côté. Ce résultat soutient l'idée que tout point dont la dynamique est conforme aux changements de courbure de la route en amont du véhicule est une bonne entrée pour le système moteur en charge du contrôle de la direction (Salvucci & Gray, 2004). De fait, imposer le suivi continu d'un tel point cible semble renforcer la coordination entre regard et contrôle du volant, ce qui rend ce dernier plus stable.

Un résultat plus inattendu concerne l'effet de l'orientation de la cible sur le positionnement dans la voie. Dans la condition contrôle, les conducteurs avaient tendance à couper les virages, comme on pouvait s'y attendre. Alors que la trajectoire restait globalement inchangée lorsque le regard était dirigé sur la voie de circulation, le décalage de la position latérale moyenne se réduisait lorsque le point tangent ou un point encore plus à l'intérieur du virage était poursuivi (Figure 17, gauche). Jusqu'ici, ce résultat est cohérent avec l'hypothèse selon laquelle regarder la trajectoire future détermine le positionnement dans la voie (Wann & Land, 2000; Wann & Swapp, 2000; Wilkie et al., 2008). Le sens de l'effet s'accorde mal en revanche avec l'idée selon laquelle l'action suit le regard, puisque le changement de position latérale est contralatéral à la déviation du regard. Pourtant, en ligne droite, Readinger, Chatziastros, Cunningham, Bulthoff et Cutting (2002) ont rapporté que des conducteurs dont le regard était dévié de la route par une tâche secondaire avaient tendance à décaler la position du véhicule dans la même direction. Deux explications à notre résultat peuvent être avancées. Premièrement, il est possible que le regard ait effectivement attiré le conducteur vers l'intérieur du virage, mais que le contrôle compensatoire en charge de corriger les erreurs de positionnement latéral ait sur-correcté le problème. Il est également possible que le positionnement du regard à l'intérieur du virage ait généré un flux optique donnant lieu à la perception d'une trajectoire trop courbée, ce qui aurait incité le conducteur à réduire l'angle au volant.

Quoi qu'il en soit, les résultats dans leur ensemble s'accordent mal avec le modèle du point tangent à strictement parler. Si le point tangent est un point saillant qui peut attirer le regard, il semblerait que ses propriétés dynamiques, et possiblement le fait qu'il soit positionné dans bien des cas à une distance adéquate en amont du véhicule, plus que sa relation géométrique avec la courbure de la route ou sa spécificité dans le flux optique, en font un indice visuel privilégié. Tout autre point ayant une dynamique similaire peut être utilisé de la même façon pour stabiliser la trajectoire. En ce sens, nos résultats soutiennent davantage le modèle de Salvucci et Gray (2004) que les autres propositions. Concernant la définition du profil de trajectoire, si les résultats suggèrent une plus grande conformité à la condition contrôle lorsque la route est regardée plutôt que le point tangent, il est difficile d'aboutir à une conclusion tranchée.

Les résultats publiés dans *PLoS ONE* (Mars & Navarro, 2012) sont plus riches d'enseignement sur ce point. Les résultats confirment que le regard est dirigé dans les 5° autour du point tangent pendant près des trois quarts du temps de conduite. Cependant, par la mise en œuvre d'une technique plus fine d'analyse des données oculométriques, nous avons démontré que le pic de distribution des directions oculaires était décalé par rapport au point tangent d'un peu plus de 1° sur la chaussée (Figure 18). L'amplitude de ce décalage est cependant nettement inférieure à celle du point de passage futur du véhicule (calculé à 2,6° en considérant le rayon de courbure moyen de la route). A partir de cette constatation, nous avons proposé une nouvelle hypothèse selon laquelle le conducteur cherche dans la région proche du point tangent la limite à ne pas franchir pour maintenir le véhicule sur la route. Le point tangent, maintenu en périphérie proche de la fovéa, fournirait un ancrage pour le suivi des changements de courbures de la route, mais le regard serait dirigé vers la limite de l'enveloppe de trajectoire acceptable. Cette proposition a le mérite de réconcilier, tout en s'en distinguant, les deux hypothèses qui font débat dans la littérature. Elle remet également en avant la notion d'enveloppe de trajectoire de sécurité, telle que proposée par

Gibson et Crooks (1938) qui me semble être bien souvent oubliée au profit de la recherche des mécanismes sous-jacents au contrôle de « la » trajectoire.

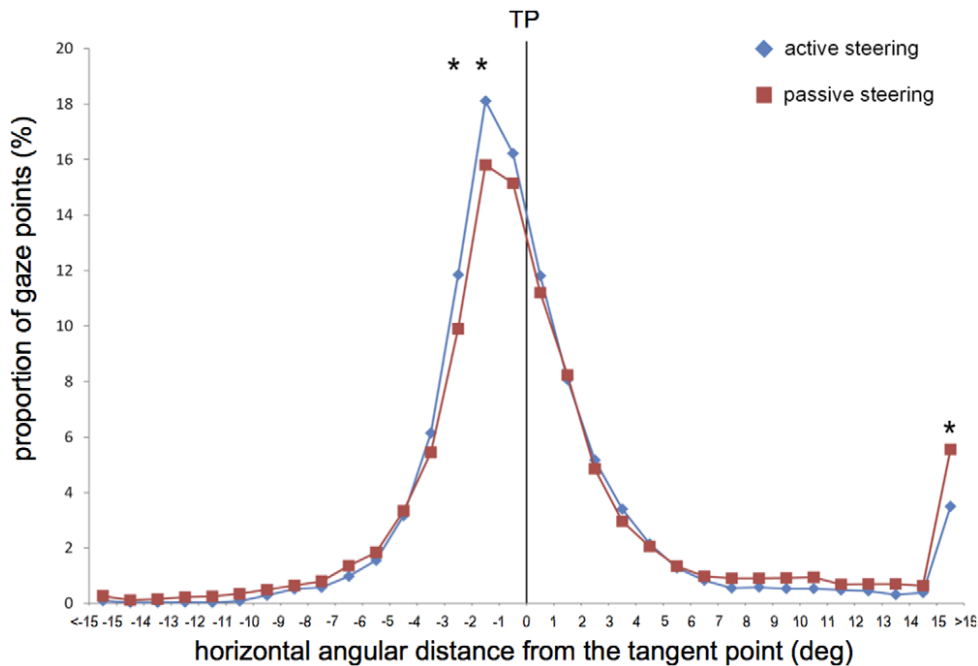


Figure 18 : Distribution des directions oculaires en fonction de l'écart angulaire au point tangent

Au-delà du rôle du point tangent, l'étude de Mars et Navarro (2012) a posé pour la première fois la question de l'influence réciproque du contrôle manuel du volant sur le positionnement du regard. En effet, l'ensemble des travaux portant sur les stratégies visuelles en conduite considèrent que les yeux guident l'action sur le volant. Or, il a été démontré dans d'autres tâches visuomotrices que l'influence n'est pas aussi unidirectionnelle. Par exemple, le système oculomoteur utilise la copie d'efférence de la commande motrice du bras dans des tâches de poursuite de cibles visuelles (Steinbach, 1969; Vercher & Gauthier, 1988). De la même façon, une illusion visuomotrice induisant une modification du mouvement du bras dans une tâche de dessin d'ellipse modifie également le contrôle du regard (Reina & Schwartz, 2003). Cependant, il a également été démontré que lorsqu'on observe la réalisation d'une tâche visuomotrice, les stratégies anticipatrices de positionnement du regard sont équivalentes à celles réalisées pendant la réalisation effective de l'action (Flanagan & Johansson, 2003). La question se posait donc de savoir dans quelle mesure le contrôle actif du volant influence le contrôle du regard dans une tâche de conduite.

Pour y répondre, nous avons comparé conduite active et conduite passive, le contrôle du volant étant pris en charge respectivement par le conducteur ou par un automate embarqué. Les résultats ont montré que la distribution du regard, notamment la prévalence des prises d'information dans la région proche du point tangent, était globalement inchangée en conduite passive. Cependant, un transfert semble s'être opéré entre les anticipations à moyen terme, significativement réduites, et les prises d'information beaucoup plus anticipatives (écart angulaire supérieur 15° sur la Figure 18). Nous avons proposé que ces fixations lointaines soient des équivalents fonctionnelles que ce que Mennie, Hayhoe, et Sullivan (2007) appellent des *look-ahead fixations*, c'est-à-dire des coups d'œil qui ne sont pas directement utiles à la réalisation de la tâche en cours mais qui

préparent la planification des actions futures. Bien que l'expérimentation ait été conçue pour empêcher le conducteur de se désengager de la tâche de suivi de contrôle du véhicule (contrôle de la vitesse maintenu, reprises en main ponctuelles nécessaires pour éviter des obstacles), il semble que les conducteurs aient choisi, consciemment ou pas, de privilégier ces prises d'informations d'ordre tactique (regarder plus loin pour mieux anticiper la route ou détecter les obstacles) au détriment des prises d'information qui alimentent la coordination visuo-manuelle. Il s'agirait donc là de deux formes d'anticipation distinctes, l'une relevant du contrôle sensorimoteur, l'autre du contrôle contextuel.

A la suite de nos travaux, Lehtonen et collaborateurs (Lehtonen, Lappi, Koirikivi, & Summala, 2014; Lehtonen, Lappi, Kotkanen, & Summala, 2013) ont repris la terminologie de *look-ahead fixations* qu'ils opposent aux *guiding fixations* pour distinguer les deux types de prises d'information. Les auteurs attribuent aux fixations lointaines deux rôles distincts : la détection anticipée de dangers potentiels sur la route et la planification de la trajectoire à un niveau supérieur au guidage en ligne. La prise d'informations relatives à des risques potentiels pour construire des marges de sécurité et adapter le comportement en fonction, notamment la vitesse d'approche, semble très probable. Ces informations pourraient inclure des estimations globales de courbure traitées comme des informations discrètes, par opposition au contrôle en ligne effectué sur la base des anticipations plus proches. En revanche, Lehtonen et al. (2014) font l'hypothèse de l'existence d'une trajectoire planifiée, en d'autres termes d'un modèle mental de la trajectoire à venir. Si des pilotes professionnels peuvent avoir intérêt à construire une représentation abstraite de la route à venir pour planifier leur trajectoire (Land & Tatler, 2001), cela me paraît nettement plus discutable chez le conducteur tout venant. L'argument mis en avant par les auteurs est la réduction du nombre de fixations *look-ahead* au fil de la répétition des essais sur un même parcours, comme si le conducteur avait construit en mémoire une trajectoire globale et n'avait donc plus besoin de consulter la route de façon anticipée. Cependant, le conducteur peut très bien avoir simplement mémorisé l'absence de danger ou de difficulté particulière sur le parcours et réduire en conséquence les prises d'informations lointaines pour se concentrer sur le contrôle en ligne. De plus, la répétition des essais s'étant accompagnée d'une élévation de la vitesse, le contrôle en ligne de la trajectoire laissait peut-être moins d'opportunités au conducteur pour réaliser des prises d'information plus anticipées. Pour conclure sur ce point dans le cadre de la réflexion sur l'articulation des niveaux de contrôle dans la conduite, il me semble plus pertinent de mettre l'accent au niveau du contrôle contextuel implicite sur la détection d'aléa et la régulation implicite du risque, alimentés par les fixations de type *look-ahead*. La construction d'un modèle mental de la trajectoire à venir, telle que proposée par Lehtonen et al. (2014), relèverait plutôt du contrôle tactique explicite au travers du diagnostic de la situation.

L'augmentation du nombre de regards dirigées très en amont du véhicule n'est très probablement que d'ordre tactique. Il reste à déterminer si la diminution du nombre de prises d'information dans la région proche du point tangent n'est que l'image en miroir du premier effet ou si elle est également l'expression de l'absence de couplage sensorimoteur en l'absence du contrôle actif du volant. Autrement dit, le contrôle actif du volant induit-il un tracking de la route plus soutenu de par les échanges d'information du système moteur du bras vers le système oculomoteur pour une meilleure coordination visuo-manuelle ? Vercher et collaborateurs (Lazzari, Vercher, & Buizza, 1997; Vercher, Lazzari, & Gauthier, 1997) proposent un modèle dans lequel le cervelet assure la coordination œil-main au

travers d'échanges de signaux non-visuels entre les deux systèmes moteurs plutôt que par une commande commune adressée simultanément aux deux systèmes. L'influence du contrôle manuel sur le contrôle oculaire se ferait sur la base de deux informations : la copie d'efférence de la commande motrice du bras servirait à synchroniser temporellement les mouvements du bras et de l'œil, alors que la proprioception des muscles du bras améliorerait la précision spatiale de l'œil. Transposé à la conduite automobile, ce modèle prédit des changements dans la dynamique des phases de poursuite des cibles selon que le conducteur agit sur le volant ou pas. Ceci serait compatible avec notre observation d'une diminution spécifique au pic de la distribution du regard (Figure 18). Cependant, la trop faible fréquence d'acquisition du simulateur (5 Hz) ne permettait pas d'analyser finement les caractéristiques spatiotemporelles de la coordination œil-main dans notre expérience et donc de valider cette hypothèse. Des travaux complémentaires en ce sens sont nécessaires et forment une perspective à ces travaux.

Pour conclure sur cette partie de mes travaux, je dirais que si la motivation initiale qui m'animait était de contribuer à trancher le débat opposant les « partisans » du point tangent aux « partisans » de la trajectoire future, ma position a foncièrement évolué depuis. De fait, les résultats présentés dans Mars et Navarro (2012) m'ont fait proposer une troisième hypothèse selon laquelle le conducteur pourrait rechercher les limites de l'enveloppe de trajectoire acceptable, mais je ne considère cette hypothèse ni comme un juge de paix, ni comme une alternative. Ma conviction acquise au fil de ces travaux est que la difficulté à trancher entre les différents indices visuels proposés, outre l'absence de méthodologie pour les distinguer véritablement (pour une analyse détaillée de ce problème, voir Lappi, 2014), est qu'il est fort probable que l'importante mobilité du système visuel pendant la conduite, même dans un environnement dépouillé, correspondent à l'utilisation d'indices multiples. La variabilité interindividuelle dans l'utilisation de ces indices est d'ailleurs très forte. Il suffit d'observer des cas individuels pour s'en convaincre : difficile de nier l'utilisation du point tangent pour des conducteurs qui s'y réfèrent à l'évidence très souvent ; difficile également de le considérer comme essentiel quand certains conducteurs ne le regardent jamais. Quant à la difficulté à déterminer ce qui relève du flux optique et de ce qui relève de la dynamique oculomotrice dans le contrôle de la trajectoire, le problème n'est guère plus simple. Si depuis Gibson (1979), il est communément admis que le flux optique est riche d'information sur les déplacements en cours, le fait est que l'on est loin d'un consensus sur la façon de modéliser le flux et sur son rôle exact, en particulier pour les déplacements curvilinéaires. Récemment, Layton et Browning (2014) ont fait la synthèse et critiqué bon nombre des théories actuelles du flux qui traitent séparément la perception de la direction du déplacement (heading) et la perception de la courbure de la trajectoire à venir (path curvature), notamment celles qui reposent sur des contraintes rigides de l'environnement ou du regard. Ils proposent en alternative un modèle computationnel qui code simultanément la direction du mouvement et la courbure de la trajectoire, ce qui s'oppose à l'idée même que le flux doit être conceptualisé et représenté comme un champ de vecteurs visuels. Les débats sur le contrôle visuel de la trajectoire ne sont pas prêts de s'éteindre.

3.2 Retours d'effort et perception des accélérations latérales

Si la vision est à l'évidence la modalité sensorielle la plus sollicitée en conduite, elle n'est pas la seule. Lorsque le véhicule se déplace, le conducteur est soumis à des accélérations

latérales et longitudinales qui ont plusieurs conséquences. Outre le fait de stimuler directement le système vestibulaire (l'accéléromètre du système perceptif), elles s'exercent sur le corps entier et modifient de ce fait les forces de contact entre le corps et les surfaces d'appui. Par ailleurs, lorsque le conducteur agit sur le volant, il reçoit au travers du système de direction des retours d'effort qui dépendent de la dynamique du véhicule. Nous allons maintenant nous intéresser au rôle de ces informations vestibulaires, somesthésiques et haptiques dans le contrôle du véhicule, mais aussi dans la perception du risque et la construction des marges de sécurité.

3.2.1 Information inertielles et contrôle de la trajectoire

La question du rôle que jouent les informations inertielles dans la conduite est centrale pour la conception des simulateurs de conduite (Kemeny & Panerai, 2003). De fait, la majorité des simulateurs sont à base fixe, ce qui prive le conducteur de ces informations. Par ailleurs, les simulateurs à base mobile ont un espace de mouvement limité qui ne permet pas, loin s'en faut, de restituer les accélérations calculées par les modèles de dynamique véhicule. Toute la problématique de la restitution du mouvement en simulateur consiste donc à exploiter de la meilleure manière possible cet espace de mouvement, en spécifiant par exemple le facteur d'échelle à adopter et en exploitant les failles de l'intégration multisensorielle (pour une synthèse récente sur la question, voir Berthoz et al., 2013).

Mettre en évidence les effets délétères de l'absence ou de la réduction des informations inertielles en simulateur est donc une façon de démontrer en creux l'importance de leur contribution au contrôle du véhicule. La littérature sur cette question est abondante et seules quelques études seront citées ici à titre d'illustration. On retiendra d'abord que l'absence de restitution de mouvement a un effet massif sur le contrôle longitudinal : les vitesses adoptées sont généralement plus élevées et les freinages beaucoup plus violents (Siegler, Reymond, Kemeny, & Berthoz, 2001). Quant au contrôle latéral, Blana et Golias (2002) ont montré que si des différences de positionnement dans la voie (écart latéral moyen) peuvent exister pour des vitesses inférieures à 60 km/h, c'est surtout la variabilité de la trajectoire qui diffère (de 60% à 220% plus importante en simulateur).

Il a également été démontré qu'en l'absence d'information inertielle, le temps de réaction à une perturbation extérieure augmente significativement (Wierwille, Casali, & Repa, 1983). Greenberg, Artz et Cathey (2003) confirment cette observation en montrant que les erreurs de trajectoire diminuent proportionnellement à la quantité de mouvement présente en simulateur à base mobile. Les auteurs ont comparé les performances de conducteurs selon plusieurs facteurs d'échelle de restitution des informations inertielles, les accélérations latérales générées par les mouvements de la plate-forme variant entre 25% et 70% de ce qui auraient été ressenti dans un véhicule réel. Le sujet devait suivre une trajectoire non-rectiligne, avec, lors de certains essais, une perturbation transversale simulant une forte bourrasque de vent. Les résultats montrent que les erreurs dans le contrôle de trajectoire diminuent lorsque le facteur d'échelle augmente. L'effet est largement significatif si l'on considère l'erreur de cap et, dans une moindre mesure, l'écart latéral moyen. De plus, les auteurs ont manipulé l'état de distraction du conducteur par un ensemble de tâches secondaires. Les résultats montrent une interaction significative entre le type de tâche secondaire et la présence/absence d'indices kinesthésiques : le nombre de sortie de voie diminue lorsque le simulateur est mobile uniquement lorsque la tâche nécessite des ressources en termes d'attention visuelle. Ces résultats suggèrent que l'absence de

stimulations inertielles impose au conducteur une charge importante en termes d'attention visuelle qui se traduit par de nombreuses erreurs de trajectoire lorsqu'une tâche secondaire doit être effectuée.

Enfin, Macuga, Beall, Kelly, Smith, & Loomis (2006) montrent le rôle des informations inertielles dans la réalisation de manœuvres de changement de voie. Alors que Wallis, Chatziastros et Bühlhoff, (2002) avaient montré que les conducteurs omettent systématiquement de redresser la direction du véhicule en l'absence de retours visuels pendant la manœuvre, la faute à une représentation erronée de la relation entre l'évolution de l'angle au volant et la direction du déplacement, les résultats de Macuga et al. (2006) suggèrent que les mouvements de lacets détectés par le système vestibulaire peuvent pallier au problème.

L'ensemble de ces résultats montre l'influence de la perception des informations inertielles, essentiellement vestibulaires, sur le contrôle en ligne de la trajectoire. De par la sensibilité de l'appareil vestibulaire à des fréquences de mouvement plus élevées que la vision, ces informations semblent particulièrement utiles pour détecter les erreurs et les perturbations plus rapidement que par le biais du canal visuel.

3.2.2 Retour haptique au volant et contrôle de la trajectoire

Le conducteur contrôle la direction de son véhicule grâce à un système mécanique qui lie le volant aux roues avant. Lorsqu'il exerce un couple sur le volant pour le faire tourner, il reçoit en retour un couple qui résulte des forces de contact qui s'exercent sur les pneumatiques et de l'arrangement cinématique du système de direction. Même si les véhicules récents, au travers des directions assistées, privilégient le confort en réduisant l'effort et la quantité de retour d'effort, cette information reste essentielle pour contrôler la direction du véhicule et le maintenir stable. Il est d'ailleurs notable que la préférence des conducteurs va à une augmentation de l'effort (diminution du coefficient d'assistance) avec la vitesse (Green, Gillespie, Reifes, Wei-Haas, & Ottens, 1984), même si, dans ce cas précis, la question reste de savoir si cette préférence est motivée par un besoin de plus de retour d'information pour la régulation du mouvement ou par la recherche de davantage de guidage par le couple d'auto-alignement des pneumatiques.

Le retour de force est proportionnel à l'amplitude de l'angle au volant pour une vitesse, une courbure de virage et des conditions d'adhérence données. Dans une configuration classique, la force qui s'exerce sur les pneumatiques (et donc approximativement l'amplitude du retour de force) est proportionnelle à l'accélération latérale, avec des distorsions minimales (Essma, 2000). Par conséquent, les retours de force sont porteurs d'informations relatives à la dynamique instantanée du véhicule. Il est donc théoriquement envisageable que les retours de force s'intègrent dans le modèle interne du comportement du véhicule que le conducteur élabore en complément des informations visuelles sur la direction du déplacement. Une autre hypothèse serait que les retours d'effort soient simplement utilisés pour rendre plus robuste le contrôle de l'angle au volant indépendamment de son effet sur le déplacement du véhicule. Autrement dit, les retours de force alimenteraient en continu un modèle interne de la *compliance*¹ du système bras-volant

¹ Le terme anglais *compliance* n'ayant pas de traduction satisfaisante en français. Il désigne la relation entre une force appliquée sur un objet et le déplacement résultant, ce qui dépend de la raideur et de la viscosité du système notamment. Appliquée au bras, la *compliance* dépend des propriétés viscoélastiques du système musculosquelettique et des contractions musculaires, qu'elles soient réflexes ou volontaires (Lacquaniti, Borghese, & Carrozzo, 1992).

de sorte à ce qu'un couple donné sur le volant se traduise en un angle voulu par le conducteur. C'est précisément la question à laquelle ont essayé de répondre Toffin, Reymond, Kemeny et Droulez (2007). Pour cela, ils ont testé en simulateur de conduite la façon dont les conducteurs s'adaptent en cours de conduite à plusieurs types de modification des lois de retour d'effort au volant. Les résultats montrent que si un conducteur est capable de s'adapter efficacement et sans même s'en rendre compte à différentes lois de restitution des retours de forces, celles-ci doivent rester suffisamment proches de ce que la mécanique imposerait naturellement. Les conducteurs pouvaient par exemple contrôler le véhicule de manière satisfaisante lorsque les retours d'effort passaient d'une fonction linéaire à une fonction non-linéaire de l'angle au volant. En revanche, l'absence de retour de force ou des retours de force inversés rendaient la conduite impossible. Pour tester les hypothèses d'adaptation des modèles internes, Toffin et al. (2007) ont ensuite cherché à rendre compte des résultats observés en ajustant les paramètres d'un modèle simplifié du système conducteur-véhicule. Les résultats montrent clairement qu'une modification du paramètre de raideur du volant ne peut pas être compensé par un ajustement d'un modèle interne de la dynamique angulaire du véhicule. Pour que le modèle rende compte des résultats observés, il faut nécessairement ajuster un modèle interne de la *compliance* du système de direction. Cela suggère qu'une modification des retours d'effort n'est pas interprétée par le système nerveux central comme un changement dans la dynamique du véhicule. Autrement dit, si les retours de force transmettent de l'information relative à la dynamique du véhicule (accélérations transversales), ils ne sont pas utilisés comme tels. Si un tel modèle interne existe, il est plus probablement construit sur la base de l'expérience visuelle.

La question des retours d'effort est d'autant plus importante que se développent de plus en plus les systèmes dit « steer-by-wire » pour lesquels la liaison mécanique entre le volant et la partie basse du système de direction est rompue. Avec ce type de système, il est théoriquement possible de générer toutes sortes de retour d'effort au volant, et donc d'assister le conducteur par ce biais. Nous évoquerons ce point plus tard lors de la présentation des travaux menés sur l'amorçage haptique du geste (section 4.2) et le contrôle partagé (section 4.3).

3.2.3 Rôle dans la construction des marges de sécurité

Au-delà de leur rôle dans le contrôle du véhicule, les informations inertielles et haptiques pourraient être utilisées pour la construction des marges de sécurité du conducteur. Par exemple, selon Blana et Golias (2002), la réduction de la distance au bord de voie observée en simulateur à base fixe par rapport à la conduite sur route réelle serait le signe d'une perception du risque altérée en l'absence d'information inertielle.

Le travail de modélisation le plus remarquable sur cette question est sans doute celui de Reymond et al. (2001). Le conducteur contrôlerait sa trajectoire en fonction d'une marge de sécurité acceptable (donc variable selon l'expérience et le type de conduite du sujet) en fonction de l'accélération latérale maximale tolérée et des déviations de trajectoire anticipées. Ce modèle rend compte du fait que les automobilistes ajustent leur conduite de telle sorte que, plus leur vitesse en courbe est grande, plus les accélérations latérales tolérées sont faibles. Il peut se résumer sous la forme suivante :

$$\Gamma < \Gamma_{\max} - \Delta C_{\max} * V^2,$$

où Γ est l'accélération latérale en virage, Γ_{\max} est l'accélération latérale maximale acceptée par le conducteur, ΔC_{\max} est la variation maximale de trajectoire que le conducteur accepterait d'entreprendre en cas de besoin, et V la vitesse.

Le modèle de Reymond et al. (2001), plus que d'autres modèles de gestion des marges de sécurité, comme celui du temps avant sortie de voie (*Time to Line Crossing*, voir VanWinsum & Godthelp, 1996), prédit la forme générique des enveloppes d'accélération latérale telles qu'elles sont observées en conduite réelle. Il rend également compte de leur modulation par des caractéristiques individuelles, la pression temporelle qui s'applique sur le conducteur ou la réduction des sensations inertielles en simulateur de conduite (Figure 19).

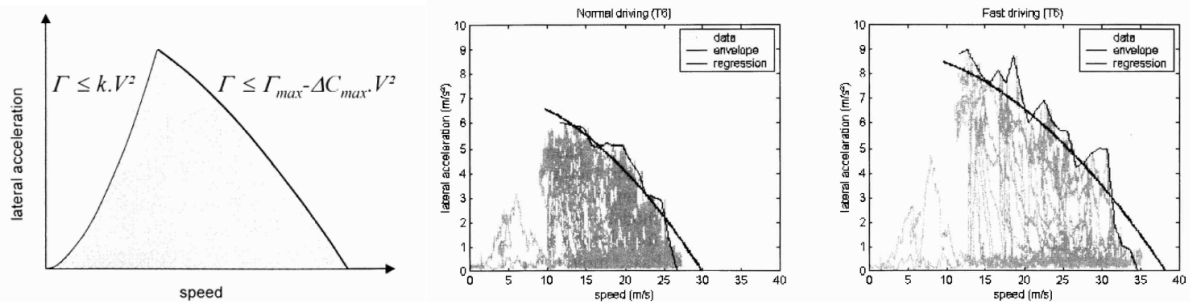


Figure 19 : L'enveloppe de trajectoire théorique prédite par le modèle de Reymond et al. (2001), à gauche, et deux enveloppes observées chez un participant en conduite normale (au centre) ou à vitesse maximale (à droite)

Le projet MEDAC, réalisé sous la direction de René Amalberti en collaboration avec le Laboratoire d'Accidentologie et de Biomécanique (GIE PSA-Renault), avait pour objectif d'évaluer l'influence de retours d'informations somesthésiques et haptiques sur la régulation implicite du risque pendant les prises de virage (Moessinger, Amalberti, Kassagi, & Mars, 2006). L'étude partait du constat que les véhicules les plus récents gommeaient en grande partie les sensations précoces de danger de par l'amélioration des châssis (limitant notamment les prises de roulis) et l'introduction des ESC (contrôle électronique de stabilité). Bien que ces évolutions aillent dans le sens de véhicules plus sûrs, le danger est de voir apparaître des adaptations comportementales ayant pour conséquence une augmentation des prises de risques. L'étude a consisté à déterminer si des signaux d'alerte précoces, c'est-à-dire présentés avant d'atteindre les limites de fonctionnement de l'ESC, peuvent réduire les phénomènes d'adaptation comportementale. Ma contribution à ce travail a consisté, dans un premier temps, à définir des signaux d'alerte, dits « naturels », agissant au niveau du ressenti véhicule par le biais de signaux somesthésiques et haptique plutôt qu'au niveau de l'évaluation consciente du risque. Ces signaux devaient s'intégrer dans le temps au sein des routines de conduite, par contraste aux effets d'une alerte classique qui ferait appel à une gestion explicite du risque de tous les instants. Il a été décidé d'agir sur la perception des accélérations latérales au travers d'une modification des forces de contacts avec le siège (coussins de maintien latéral se dégonflant) et d'une modification du couple au volant (équivalent à une sensation de perte partielle d'adhérence) lors du dépassement d'un seuil de sollicitation du véhicule en virage. Les stimuli étaient calibrés de sorte à être approximativement à la limite des seuils de perception. L'objectif ici était de ne pas déclencher d'émergences cognitive fortes, mais plutôt de laisser les signaux s'intégrer à un niveau de traitement implicite.

L'objectif impliquait que cette étude ait un caractère longitudinal où l'on était amené à comparer le processus d'adaptation en fonction des caractéristiques du véhicule. Trois

conditions d'assistance ont été étudiées : (a) un véhicule d'ancienne génération (Mégane I) dépourvu d'ESC, (b) un véhicule de nouvelle génération (Mégane II) équipé d'ESC, (c) le même véhicule récent avec présentation précoce de signaux de danger. Chaque sujet était assigné à l'un de ces trois groupes et participait à trois phases de conduite sur piste : une phase de familiarisation à l'environnement et de prise en main du véhicule, une phase de test de performance de conduite sous contrainte temporelle, puis une phase de consolidation où la conduite s'effectuait sans contrainte. Les résultats montrent que les signaux d'alerte n'ont pas eu d'effet pendant la phase de test, suggérant que le contrat de performance élevée que se fixaient les conducteurs prenait le pas sur des signaux d'alerte très modérés. En revanche, les conducteurs ayant déclenché le système d'alerte pendant la phase de test ont roulé moins vite en phase de consolidation. Les modifications comportementales (accélérations, décélérations et vitesse) étaient observées aussi bien en lignes droites qu'en virages, quoiqu'elles différaient selon le type de virage (diminution de la vitesse maximale au point de corde dans les virages rapides ; diminution de l'accélération transversale dans les virages lents). Cependant, les entretiens post-expérimentaux ont révélé que lorsque les conducteurs percevaient consciemment les signaux d'alerte, les modifications comportementales n'apparaissaient pas. Par conséquent, même si l'étude ne permet pas de conclure à la pérennité de ces modifications comportementales, elle montre que les marges de sécurité augmentent chez des conducteurs soumis à des stimuli agissant au niveau préconscient et simulant l'approche des limites des capacités dynamiques du véhicule.

3.2.4 Le cas de la perception des pertes d'adhérence

Détecter les signes précurseurs d'une perte d'adhérence est essentiel pour éviter certains accidents. Quels sont les indices sensoriels les plus utiles à cette détection et, lorsqu'ils interviennent, à quels types d'expériences perceptives donnent-ils lieu ? Étonnamment, ce sont des questions largement inexplorées. Nous nous y sommes intéressés dans le cadre d'une collaboration pluridisciplinaire avec Jean-François Petiot (équipe IS3P de l'IRCCyN) et le Centre Technique de Simulation de Renault, au travers du co-encadrement de la thèse CIFRE de Thomas Denoual. Le travail visait à déterminer l'apport de la restitution de mouvement en simulateur dynamique pour rendre compte des situations de perte d'adhérence et caractériser le ressenti des conducteurs face à l'intervention d'un dispositif d'assistance intervenant sur le contrôle de la trajectoire, tel que l'ESC. L'objectif finalisé était de permettre une meilleure utilisation des outils de simulation dans le processus de conception et une réduction des essais physiques réalisés sur piste d'essai.

Afin d'approcher cet objectif, deux protocoles expérimentaux identiques ont été conduits sur le simulateur à base fixe de l'IRCCyN et le simulateur dynamique Ultimate du Technocentre Renault, le même logiciel de simulation opérant sur les deux plateformes (Denoual, Mars, Petiot, Reymond, & Kemeny, 2011). Les sujets avaient pour tâche de négocier à vingt reprises un virage donné dont les propriétés d'adhérence étaient manipulées (3 intensités * 3 durées de perte d'adhérence). Les perturbations provoquaient un survirage du véhicule dans des proportions qui permettaient toutefois de garder le contrôle du véhicule. Après chaque essai, le conducteur cotait son degré d'accord avec dix affirmations relatives à son ressenti pendant la perte d'adhérence. Certains items décrivaient des sensations en termes de danger perçu, de maîtrise du véhicule et de caractéristiques perçues de la perturbation (durée et intensité). Trois autres items sondaient dans quelle mesure la perturbation avait été perçue au travers de chacun des canaux

sensoriels potentiellement impliqués : vision, retours de force au volant et sensation vestibulo-somesthésiques de mouvement de la plateforme. Les résultats montrent des effets minimes du type de simulateur sur les indicateurs de la dynamique du véhicule et du comportementaux du conducteur (vitesse de lacet, temps de retour à un état stable, angle au volant maximum). Du point de vue subjectif, la restitution de mouvement n'a que marginalement modifié la perception des caractéristiques de la perturbation. Dans les deux cas, les différents degrés d'intensité des pertes d'adhérence étaient bien discriminés, quoique partiellement contaminés par leur durée. A l'opposé, la durée perçue des perturbations montre une interaction très forte entre durée et intensité réelles, suggérant une distorsion de la perception du temps pour les pertes d'adhérences les plus fortes, estimées les plus dangereuses. Tse, Intriligator, Rivest et Cavanagh (2004) proposent que ce type d'effet est de nature attentionnelle : lorsqu'un événement critique intervient, il est perçu comme ralenti car l'information est davantage analysée par unité de temps objectif. En revanche, les deux simulateurs se distinguent très clairement lorsqu'on analyse les modalités sensorielles privilégiées par la perception des pertes d'adhérence (Figure 20). Le canal haptique, au travers des sensations au volant, est prépondérant en simulateur à base fixe, alors que les sensations somesthésiques dominent avec une base mobile. Il semble donc que les conducteurs privilégient la source d'information la plus saillante et la plus fiable parmi les informations disponibles. La perturbation des retours d'effort au volant correspond à la lecture la plus directe de la perte d'adhérence, mais, en simulateur dynamique, les variations subites du roulis et de l'angle de lacet transmises par les mouvements de la plateforme semblent encore plus déterminantes.

Les travaux ont ensuite cherché à modéliser les relations entre indicateurs objectifs de la dynamique du véhicule et descripteurs subjectifs (Denoual, Petiot, Mars, & Kemeny, 2012). Il s'agissait d'établir par une méthode de régression linéaire multiple le meilleur modèle explicatif des relations entre quatre indicateurs subjectifs et sept indicateurs de la dynamique du véhicule. Les indicateurs objectifs retenus pour chaque modèle ont été sélectionnés par une procédure pas-à-pas selon le critère AIC (Akaike Information Criterion). Sans rentrer dans le détail des résultats obtenus, on retiendra des différences observées entre les modèles obtenus pour le simulateur statique et pour le simulateur dynamique l'importance des informations inertielles, et en particulier des accélérations latérales induites, pour juger des situations de perte d'adhérence. Néanmoins, les modèles linéaires sélectionnés expliquent plus de variance pour les données issues du simulateur statique (~70%) que pour le simulateur dynamique (~50%). L'utilisation de modèles linéaires simples semble donc insuffisante pour bien rendre compte de l'intégration multisensorielle, notamment visuo-vestibulaire, qui entre en jeu lorsque le mouvement physique est restitué (Kemeny & Panerai, 2003). De plus, il convient de noter que si les modèles obtenus pour le simulateur statique ont une meilleure capacité explicative, leur capacité prédictive est faible.

En dernier lieu, une expérimentation a été réalisée pour valider la recherche d'un point de vue industriel. Il s'agissait de déterminer dans quelle mesure le modèle obtenu en situation dynamique permettait de caractériser le ressenti subjectif des conducteurs lorsqu'un système d'aide au contrôle de la trajectoire de type ESC entrainé en fonctionnement pendant les pertes d'adhérence (Denoual, Mars, Petiot, & Kemeny, 2012). Les résultats sont mitigés dans la mesure où, si la capacité prédictive du modèle s'avère relativement satisfaisante sans le déclenchement de l'ESP, elle chute lorsque le système intervient.

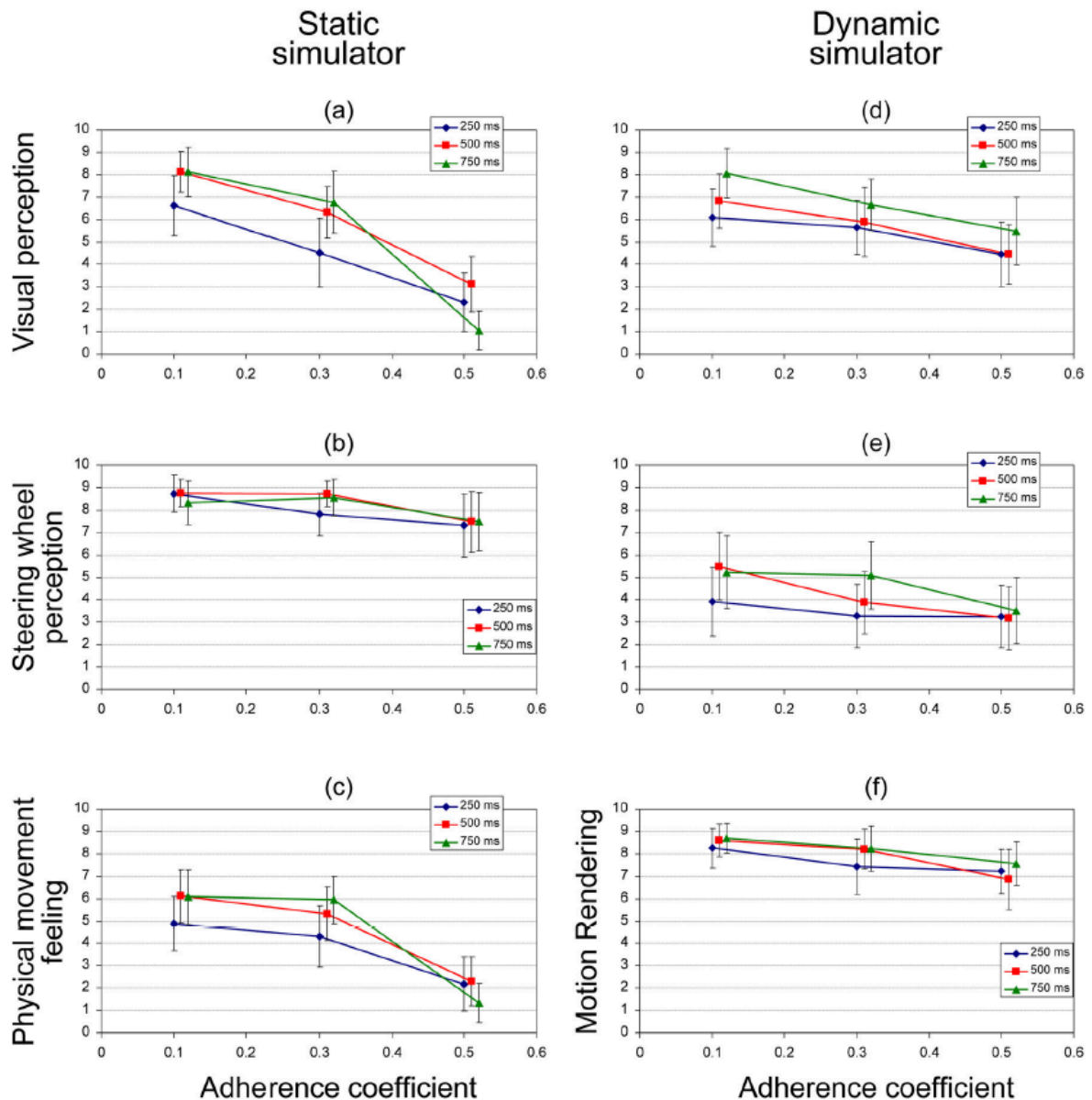


Figure 20 : Évaluation subjective de l'importance de chaque source d'information (vision, retour d'effort au volant et sensation de mouvement physique) dans les deux simulateurs à base fixe (statique) et à base mobile (dynamique) en fonction de l'intensité et de la durée de la perte d'adhérence. Plus le coefficient d'adhérence est faible, plus l'intensité est forte. Extrait de Denoual et al. (2011).

L'objectif initial de ce travail, modéliser les liens entre les effets de différents typages d'ESC sur la dynamique du véhicule et le ressenti subjectif des conducteurs sur simulateur, était probablement trop ambitieux. Cependant, ce travail a permis des avancées significatives sur deux questions originales : la pondération des différentes informations sensorielles dans la perception des pertes d'adhérence et les émergences cognitives qui en découlent. Sur la première question, on retiendra que les perturbations haptiques aux volant sont indéniablement prises en compte, comme on pouvait s'y attendre, mais qu'elles peuvent être éclipsées par les sensations inertielles en roulis et en lacet captées par l'appareil vestibulaire notamment. La vision ne contribue que secondairement par comparaison. Quant aux émergences cognitives, elles ne semblent pas liées à un indicateur particulier de la dynamique du véhicule, ni même à une combinaison linéaire de plusieurs de ces indicateurs.

3.3 Modélisation cybernétique du contrôle latéral

Mes travaux expérimentaux sur le contrôle de la trajectoire ont ouvert la voie à un travail interdisciplinaire sur la modélisation cybernétique du conducteur, en collaboration avec l'équipe *Commande* de l'IRCCyN, en particulier Philippe Chevrel, Fabien Claveau et Jean-François Lafay. Ce travail a été initié par le co-encadrement du post-doc de Chouki Sentouh et s'est poursuivi dans le cadre de la thèse de Louay Saleh. Il s'agit en substance d'exprimer les processus sensorimoteurs impliqués dans le contrôle du véhicule dans un formalisme tiré de la théorie de la commande. L'objectif en termes de conception de système était initialement de concevoir un contrôle partagé de la direction fondé sur le modèle ainsi défini. J'aurais l'occasion de revenir sur ce point dans la section 4.3.4, mais je vais concentrer mon propos pour l'instant sur ce qui a été ma contribution principale à ce travail : la définition de l'architecture du modèle en fonction des connaissances actuelles en psychologie de la perception et en neurophysiologie du contrôle moteur. Je présenterai également les résultats des quelques essais expérimentaux visant à tester la validité du modèle. La mise en équation du modèle et la mise en œuvre des méthodes d'identification des paramètres reposant entièrement sur mes collaborateurs automaticiens, je ne les détaillerai pas ici.

L'élaboration de modèles du conducteur en automatique n'est pas une approche nouvelle. Elle constitue cependant une tendance forte à l'erreur actuelle (Cacciabue, 2007). Le principe général de ces modèles est le suivant : en situation de conduite, le conducteur agit comme le contrôleur d'un système dynamique complexe. Cette métaphore technologique se justifie dans la mesure où le conducteur contrôle le véhicule en utilisant à la fois un ensemble varié de signaux (sensoriels) et une représentation de certaines propriétés de la dynamique du système contrôlé (le véhicule). L'approche que nous avons adoptée pour aborder le problème du contrôle de la trajectoire est aux antipodes d'une approche « boîte noire » qui ne viserait qu'à rendre compte du comportement du conducteur sans considérer les processus de traitement de l'information qui le gouvernent. Au contraire, nous nous sommes inscrits dans une approche « boîte grise » selon laquelle la structure du modèle et ses paramètres sont définis par des signaux sensoriels pertinents pour la réalisation de la tâche (entrée du modèle) et les transformations opérées sur eux (fonctions de transfert).

Le travail porte en particulier sur la modélisation du contrôle de la dimension latérale de la trajectoire effectué par le conducteur à partir des entrées visuelles et proprioceptives dont il dispose. La modélisation du contrôle visuel de la trajectoire s'est appuyée sur l'analyse de la littérature et les conclusions des études expérimentales rapportées dans le chapitre 3.1. En particulier, nous avons retenu le principe du contrôle visuel à deux niveaux selon lequel l'anticipation alimentée par la vision lointaine assure la stabilité du contrôle et la compensation alimentée par la vision proche corrige les erreurs de positionnement latéral. Plus précisément, le modèle à action proportionnelle intégrale de Salvucci et Gray (2004) a servi de point de départ pour le travail de modélisation, avec l'angle au centre de la voie légèrement en amont du véhicule servant d'entrée à un compensateur et l'angle au point tangent servant d'entrée à un gain d'anticipation. L'angle au point tangent est considéré ici comme un indicateur des changements de courbure de la route et il peut être aisément isolé dans la scène visuelle à l'aide de capteurs vidéo embarqués et de méthodes de traitement d'image adaptées (Gallen & Glaser, 2009). Il peut donc être utilisé comme tel dans les lois de commandes des assistances au contrôle latéral. Puisqu'une grande partie des prises

d'information du conducteur est faite dans la région du point tangent, on s'assure ainsi que le contrôle visuel de la trajectoire du conducteur et de l'automate s'effectue en cohérence.

Cependant, ce modèle à deux niveaux reste un modèle purement visuel. En d'autres mots, la sortie du modèle correspond à une variable d'intention en termes d'angle au volant qui doit encore être converti en commande motrice. Il convient donc d'intégrer au modèle la capacité du conducteur à prendre en compte les propriétés mécaniques du système de direction, ainsi que les retours d'effort au volant. Ceux-ci renseignent le conducteur sur les forces de contact qui s'exercent sur les pneumatiques et sur l'arrangement cinématique du système de direction. Ils fournissent également des informations utiles pour contrôler la direction du véhicule et la maintenir stable. Leur prise en compte est d'autant plus nécessaire dans le cadre d'un contrôle partagé entre le conducteur et un automate que leur dynamique sera modifiée par l'assistance elle-même.

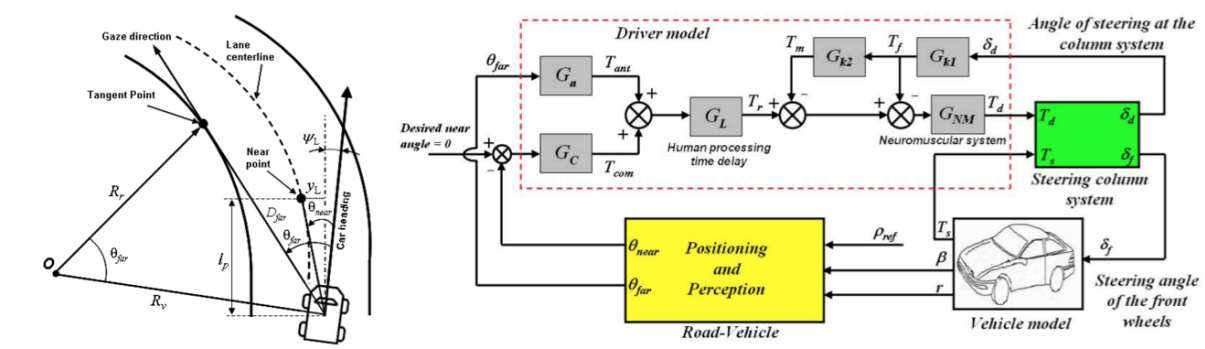


Figure 21 : Le modèle de Sentouh, Chevrel, Mars et Claveau (2009). A gauche, la géométrie des angles visuels en entrée du modèle ; à droite, le schéma fonctionnel.

La prise en compte des retours de force au volant dans le modèle s'est faite dans un premier temps en s'inspirant de l'architecture proposée par Hess et Modjtahedzadeh (1990), modèle du système neuromusculaire qui fait référence dans le domaine de la modélisation du conducteur, mais dépourvu de capacité à anticiper les changements de courbure de la route. En combinant et en adaptant les approches de Salvucci et Gray (2004) et Hess et Modjtahedzadeh (1990), nous avons abouti à une première architecture, illustrée par la Figure 21 (Sentouh, Chevrel, Mars, & Claveau, 2009). La validation expérimentale de cette première mouture du modèle a été très modeste puisqu'elle n'a porté que sur des simulations numériques. Cependant, les résultats étaient encourageants, avec notamment des valeurs issues de l'identification paramétrique cohérentes avec les hypothèses sous-jacentes au modèle dans sa partie visuelle : un profil de trajectoire très prudent, minimisant les écarts latéraux, donnait lieu à un gain élevé pour la compensation, alors qu'un profil de trajectoire plus agressif, coupant fortement les virages, donnait lieu à un gain élevé pour l'anticipation. Une validation externe a été apportée par Steen et al. (2011) dans le cadre d'une étude comparative confrontant cinq modèles de contrôle visuel de la trajectoire déjà publiés. L'analyse conclut sur les très bonnes performances du modèle de Sentouh et al. (2009), avec quelques préconisations d'évolution pour améliorer ses performances.

Rapidement, indépendamment de la performance du modèle, il m'est apparu que la représentation du système neuromusculaire pouvait difficilement être reliée à des mécanismes connus du point de vue de la neurophysiologie. Le rôle de chaque composante n'étant pas précisé, il était difficile de poser des hypothèses sur l'adaptation du modèle à des variations du comportement du conducteur ou d'interpréter les valeurs des paramètres.

Une solution bien plus satisfaisante a été proposée Hoult et Cole (2008). Leur modèle est basé sur les principes de co-contraction des muscles antagonistes et de co-activation musculaires par les afférences α et γ . En bref, l'activité musculaire est contrôlée simultanément par une commande en boucle ouverte et une commande en boucle fermée. La boucle ouverte correspond à l'activation des muscles par les motoneurones α , au travers d'un modèle interne de la raideur de la direction (conversion d'un angle « désiré » en commande en couple). Simultanément, les signaux de position et de vitesse des bras issus des fuseaux neuromusculaires sont comparés aux signaux transmis par les motoneurones γ . Le réflexe d'étirement opère à partir des différences mesurées et permet de rejeter des perturbations externes. La co-contraction des muscles antagonistes permet d'augmenter la raideur des bras, ce qui permet à l'angle au volant de suivre au plus près la valeur de référence fournie par le signal γ . S'inspirant des principes représentés dans le modèle de Hoult et Cole (2008) et en les intégrant aux processus sous-tendant le contrôle visuel de la trajectoire, nous avons proposé un nouveau modèle reposant cette fois entièrement sur des hypothèses explicites concernant les processus sensorimoteurs impliqués dans la réalisation de la tâche. L'architecture générale du modèle et ses fondements perceptivo-moteurs, que je vais présenter maintenant, sont détaillée dans Mars, Saleh, Chevrel, Claveau et Lafay (2011). Le détail de la mise en équation et de l'identification paramétrique est disponible dans Saleh, Chevrel, Mars, Lafay, et Claveau (2011) et son application à la conception d'un contrôle partagé de la direction dans Saleh, Chevrel, Claveau, Lafay et Mars (2012, 2013).

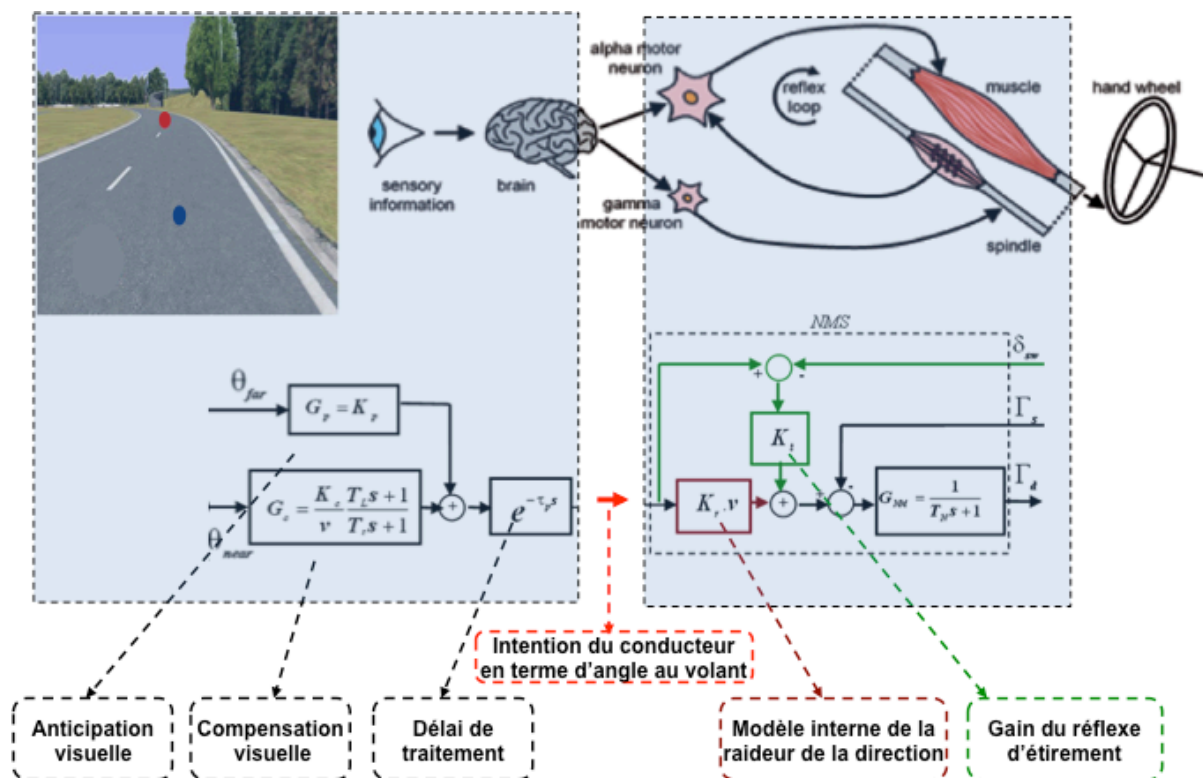


Figure 22 : Nouvelle architecture d'un modèle conducteur de contrôle de la trajectoire (Mars et al., 2011)

La Figure 22 présente l'organisation du modèle en rapport avec les mécanismes sensorimoteurs dont il cherche à rendre compte. Tout comme dans Sentouh et al. (2009), l'anticipation visuelle est réalisée par une simple action proportionnelle G_p sur l'angle au point tangent θ_{far} et la compensation visuelle est déduite de l'angle au point proche θ_{near}

perçu à distance $\ell_s=5\text{m}$ à l'avant du véhicule, par l'intermédiaire de la transmittance G_c . Le gain de compensation K_c est modulé par la vitesse longitudinale du véhicule V_x en considérant que le conducteur effectue moins de compensation avec l'augmentation de la vitesse. L'addition des sorties des deux modules visuels génère un angle δ_{sw} , supposé traduire l'intention du conducteur en termes d'angle au volant, compte tenu d'un délai de traitement τ_p . Le modèle du système neuromusculaire s'appuie sur les travaux de Hoult et Cole (2008). Contrairement à ces auteurs cependant, le modèle proposé ici élabore un couple sur le volant, Γ_d , et non une consigne angulaire. L'intention angulaire δ_{sw} est transmise en premier lieu au modèle interne de la raideur de la direction, simplement modélisé par un gain K_r modulé par la vitesse V_x , ce qui permet de tenir compte du fait que la direction durcit avec la vitesse. Les propriétés passives des bras (inertie, amortissement, etc.) sont modélisées par un système de premier ordre G_{NM} . Le gain K_t représente le réflexe d'étirement du muscle qui vérifie que l'angle désiré δ_{sw} est conforme à l'angle appliqué sur le volant (δ_d). Une augmentation de K_t pourra refléter une augmentation de la co-contraction des muscles agonistes et antagonistes pour rigidifier le maintien du volant.

Un travail préliminaire de validation du modèle a consisté à identifier ses huit paramètres sur la base d'observations recueillies chez cinq conducteurs. Les participants ont été invités à conduire sur une piste virtuelle d'environ 2,5 Km de long et composée de virages de rayon compris entre 55 et 120 m, ce qui est censé fournir des signaux d'excitation suffisamment riches. Le jeu de données recueillies dans la première partie du circuit a été choisi pour effectuer l'identification, tandis que le jeu de données recueillies dans la seconde partie a été utilisé pour la validation. Les résultats montrent que les algorithmes d'identification ont convergé vers une gamme de valeurs homogènes chez les cinq sujets, avec un taux d'ajustement moyen de 69% (Tableau 1).

Tableau 1 : Valeurs identifiées des paramètres du modèle pour les cinq conducteurs

	K_p	K_c	T_r	T_L	τ_p	K_r	K_t	T_N	Taux d'ajustement (R ²)
Valeurs initiale	3.40	15	1	3.0	0.04	1	12	0.10	-
S1	3.32	12.21	1.11	3.6	0	1.07	10.43	0.12	70%
S2	3.21	11.20	0.84	3.0	0	1.05	11.57	0.14	68%
S3	3.23	12.58	0.89	2.96	0	1.05	10.91	0.14	68%
S4	3.25	10.71	1.18	3.86	0	1.05	11.32	0.14	75%
S5	3.17	11.49	1.05	3.27	0	1.01	12.43	0.12	62%

Aucun paramètre n'a fait l'objet de résultats anormaux, à l'exception de τ_p , identifié comme nul dans tous les cas. Ceci peut être expliqué par le fait que le processus d'identification ne pouvait pas distinguer le délai de traitement visuel de celui associé au retard de traitement (calcul de la dynamique du véhicule, visualisation, etc.) et de communication au sein du simulateur de conduite. L'identification du modèle interne de la raideur de la direction (K_r) a donné lieu à des valeurs presque égales, ce qui est cohérent avec le fait que la rigidité du système de direction était identique pour tous les participants. Ce résultat est en cohérence avec l'hypothèse selon laquelle les conducteurs ont une connaissance implicite de la relation

entre le couple et la position du volant. Par ailleurs, la variabilité de certains paramètres reflète probablement les particularités propres au style de conduite de chaque conducteur. Les variations observées pour les trois paramètres du modèle interne de compensation (K_c , T_i et T_L) peuvent refléter la propension du conducteur à ne pas trop approcher des bords de voie (par prudence, par exemple). De même, les différences observées dans les valeurs du gain reflexe (K_t) peuvent signifier que les conducteurs tiennent le volant plus ou moins fermement.

Une autre façon de valider le modèle a consisté à lui faire piloter le volant du simulateur de conduite et à comparer sa performance avec le conducteur humain ayant servi à son identification. La comparaison a été réalisée en demandant au conducteur S1 de négocier une série de virages (différente du parcours ayant permis l'identification du modèle). Dans les deux cas, l'humain était en charge du contrôle de la vitesse. Le contrôle de la direction était assuré par le modèle dans le second cas. Les résultats montrent que le conducteur et son modèle identifié ont des trajectoires très similaires. L'écart latéral maximal par rapport à la ligne centrale était de 0,9 m pour S1 et de 0,81 m pour le modèle (SD = 0,21 dans les deux cas). L'écart type de l'angle de l'angle au volant était respectivement de 0,26 et 0,21 rad.

Ces premiers résultats sont encourageants, mais des expérimentations plus extensives sont maintenant nécessaires pour valider le modèle. Le principe de ces expérimentations serait de procéder à des manipulations spécifiques de l'environnement visuel, des caractéristiques du système de direction et des instructions données aux conducteurs, de sorte à sonder le modèle et à déterminer dans quelle mesure chacun de ses paramètres est sensible à la manipulation expérimentale sensée l'impacter. Par exemple, le changement des caractéristiques du système de direction du véhicule devrait très majoritairement impacter les paramètres K_r et K_t . Les premiers essais réalisés en rendant moins rigide la colonne de direction semblent aller dans ce sens. Le Tableau 2 permet de comparer les résultats d'un participant avec les deux réglages du coefficient d'assistance de direction. Les caractéristiques de la nouvelle colonne de direction ont bien impacté l'identification du système neuromusculaire, principalement au travers des deux paramètres K_r et K_t . Le gain interne de la raideur de direction K_r est plus petit, indiquant une colonne de direction plus légère, de même que le gain du réflexe d'étirement K_t , indiquant un moindre maintien du volant par le conducteur. Les changements des autres paramètres sont négligeables, sauf pour la compensation visuelle qui subit une légère modification (K_c , T_i et T_L). Cette partie du modèle conducteur représente la dynamique latérale du véhicule comme apprise par le conducteur, ce qui pourrait expliquer l'incidence observée, mais elle reste principalement dépendante des entrées visuelles.

Tableau 2 : Estimation paramétrique pour deux réglages différents de la direction

	K_p	K_c	T_i	T_L	τ_p	K_r	K_t	T_N	R_{fit}
Colonne rigide	3.32	12.21	1.11	3.6	0	1.07	10.43	0.12	70%
Colonne légère	3.40	15.00	1.00	3.0	0	0.30	0.50	0.10	72%

Comme déjà mentionné, ces travaux de modélisation du conducteur ont été motivés par la définition d'une stratégie de conception d'un automate pour le contrôle partagé de la direction (cf. section 4.3.4). Plus récemment, nous avons étendu le domaine d'application du

modèle à l'estimation de l'état de distraction du conducteur. Les premiers résultats montrent que l'erreur de prédiction du modèle lors de phases de conduite avec ou sans distraction (cognitive, visuelle, motrice ou visuomotrice) varie de façon cohérente avec les performances de conduite (Ameyoe, Mars, Chevrel, Le Carpentier, & Illy, 2015). Là encore, la validation du modèle passera par la mesure de la sensibilité de ses paramètres pour discriminer ces différents types de perturbation.

4. Coopération homme-machine pour le contrôle de la trajectoire

Les travaux présentés jusqu'ici concernent l'identification des processus qui entrent en jeu dans la perception de l'environnement et dans le contrôle du déplacement. Ils concernent avant tout la façon dont le conducteur interagit avec son véhicule en s'adaptant aux possibilités d'action qu'il propose et aux contraintes qu'il impose. Même s'ils sont largement indissociables, les travaux qui vont être exposés maintenant posent une question sensiblement différente puisqu'il s'agit de définir le type d'actions qu'il serait judicieux de faire entreprendre à des dispositifs automatiques embarqués dans le véhicule pour assister le conducteur dans sa tâche. Il s'agit également de caractériser le comportement du conducteur en interaction avec ces dispositifs. Ici, le cadre théorique pertinent est double. Il relève d'abord de la compréhension des processus qui sous-tendent la conduite automobile, en particulier les aspects perceptivo-moteurs, et la gestion, implicite et explicite, des risques de sortie de voie. Il s'inscrit ensuite dans le cadre théorique de la coopération homme-machine (CHM), vue comme une gestion d'interférences entre agents. De fait, travailler à améliorer le système homme-machine revient à travailler sur les interférences, positives comme négatives, entre les deux agents.

4.1 Classification des modalités d'assistance à la conduite

Les solutions pour assister le conducteur dans le contrôle de son véhicule sont nombreuses. Certaines sont commercialisées (et même parfois obligatoires) depuis longtemps, comme l'ABS (Anti-Blocking System) ou l'ESC (Electronic Stability Control). D'autres sont plus récentes et généralement optionnelles, avec une diffusion progressive dans les véhicules à partir du haut de gamme. D'autres encore, moins matures, font encore l'objet de recherches et préparent l'arrivée des véhicules autonomes. Tenter de décrire l'ensemble de ces systèmes par les technologies qui les rendent possibles n'est qu'assez peu pertinent pour les concepteurs qui s'intéressent aux interactions avec l'utilisateur. Depuis les travaux fondateurs de Sheridan et Verplank (1978), plusieurs propositions ont été faites pour catégoriser les systèmes automatisés selon leur niveau d'automatisation, c'est-à-dire leur degré d'intervention dans la réalisation de la tâche (pour une synthèse récente, voir Sheridan, 2011). Pour aller plus loin, Parasuraman, Sheridan et Wickens (2000) ont proposé d'étendre ce type de classification en précisant les points d'entrée de l'assistance dans la chaîne de traitement de l'information par l'homme (traitement sensoriel, perception/mémoire de travail, prise de décision, sélection de la réponse) et par la machine (acquisition de l'information, analyse de l'information, sélection de la décision, implémentation de l'action). Plus directement appliqué à la conduite automobile, Hoc, Young et Blosseville (2009) ont proposé une classification en termes de modalité de coopération homme-machine, en plaçant la notion d'interférence entre agents au cœur de la réflexion. Adaptée au contrôle latéral du véhicule, cette classification a été reprise et modifiée par Navarro, Mars et Young (2011), en y intégrant la distinction entre automatisation du véhicule et automatisation de la conduite proposée par Young, Stanton, et Harris (2007). C'est la classification de Navarro et al. (2011) sur laquelle je vais maintenant me baser, tout en m'en écartant sur certains points (Figure 23).

Vehicle automation	Driving automation			
Integrated mode	Perception mode	Mutual control mode		Delegation function mode
		Warning mode	Co-action mode	
Electronic stability control (ESC)	Vision enhancement systems (VES)	Lane departure warning systems (LDWS)	Lane keeping assistance systems (LKAS)	Automatic steering (AS)

Figure 23 : La classification des systèmes d'assistance au contrôle latéral proposée par Navarro et al. (2011)

La première distinction fondamentale qui peut être posée est celle entre l'automatisation du véhicule et l'automatisation de la conduite. La première concerne les dispositifs qui assistent le conducteur en agissant sur la dynamique du véhicule sans viser à établir à proprement parler une coopération avec le conducteur. Il s'agit, par exemple, de l'ABS qui reçoit en consigne d'entrée un appui sur la pédale de frein et qui va maintenir les roues en rotation en opérant un freinage discontinu. L'objectif est de maintenir l'adhérence des pneumatiques à la route et, en conséquence, la contrôlabilité du véhicule. L'action du dispositif peut être ressentie au travers du retour haptique sur la pédale, mais ce feedback n'a pas vocation à informer le conducteur. Il peut même être considéré comme un bruit ajouté aux retours d'effort pédale dans la boucle de contrôle du freinage. Les dispositifs de type ESC (qui sont de fait une surcouche de l'ABS) sont l'équivalent pour le contrôle latéral. En agissant spécifiquement sur le freinage d'une roue, ils repoussent les limites de l'enveloppe dynamique du véhicule en évitant sur-virages et sous-virages. Les conséquences sur le comportement du conducteur peuvent exister en termes d'adaptations comportementales (« mon véhicule tient mieux la route, donc je peux rouler plus vite en virage »), mais le dispositif ne cherche pas non plus à établir une forme de coopération avec le conducteur. Il agit « en sous-marin » pour faire en sorte que l'action du conducteur ne fasse pas sortir le véhicule d'un état dynamique sécuritaire. A contrario, l'automatisation de la conduite va viser à influencer directement le comportement du conducteur.

Le premier niveau d'automatisation de la conduite est ce que Hoc et al. (2009) et Navarro et al. (2011) désignent sous le terme de mode perceptif. J'y préfère le terme de perception augmentée, car il s'agit d'enrichir les informations sensorielles et de fournir des mesures inaccessibles directement au conducteur. Le compteur de vitesse en est l'expression la plus simple : les systèmes perceptifs ne permettant pas d'estimer de façon précise la vitesse absolue du déplacement, le système technique en fait une mesure objective et la restitue au conducteur, sans l'interpréter. Ici, elle est délivrée de façon symbolique sous une forme numérique, mais on peut se poser la question de savoir quelle information fournir pour alimenter les boucles sensorimotrices. De nos jours, la question se pose de savoir comment

exploiter au mieux les nouvelles modalités d'interfaçage avec le conducteur. L'enrichissement de la scène visuelle par l'entremise des afficheurs tête-haute tel qu'il est envisagé dans les travaux présentés en section 4.2 relève de ce type d'assistance, puisqu'il s'agit d'enrichir la scène visuelle pour guider le regard et alimenter le contrôle visuel de la trajectoire.

A la différence de la perception augmentée, la notion de contrôle mutuel implique une interprétation de l'information par l'automate avant transmission à l'humain. L'assistance peut intervenir par exemple lorsque le conducteur dépasse un seuil prédéfini en termes de risque. L'intervention peut consister en une simple critique du comportement du conducteur, comme une alerte ou un avertissement. Dans ce cas, on cherche à orienter l'attention du conducteur vers un danger ou à informer le conducteur sur l'état de son véhicule dans l'environnement. L'information peut être délivrée de façon explicite, en faisant appel à la sagesse du conducteur. Il s'agit dans ce cas d'une assistance au diagnostic de la situation. On peut également chercher à informer sur un mode plus implicite sous la forme d'une stimulation supposée pouvoir être interprétée de façon univoque et associée, après apprentissage, à une routine d'action.

Si le dispositif fait plus qu'avertir en donnant une indication sur la nature de la correction nécessaire, on peut parler de suggestion d'action. Si l'information doit être interprétée, explicitement ou implicitement, le cas de figure est le même que pour l'avertissement. En revanche, s'il s'agit de faciliter la mise en œuvre de l'action par la stimulation des effecteurs de la commande, le contrôle sensorimoteur peut être cette fois sollicité. Plus l'action du dispositif va s'insérer judicieusement dans l'action du conducteur, plus la mise en œuvre de la réponse a des chances d'être rapide et efficace. Il ne faut cependant pas exclure des interférences négatives, ni négliger la possible modulation ou inhibition du mécanisme d'action par des processus cognitifs. La question de l'articulation entre contrôle sensorimoteur et prise en compte du contexte est donc ici primordiale. Ce point est central dans les travaux que nous avons menés sur l'amorçage haptique du geste (cf. section 4.3).

Dans Navarro et al. (2011), nous avons définie comme sous-catégorie au contrôle mutuel la notion de co-action qui regroupe les dispositifs influençant directement la trajectoire au travers d'une action sur les commandes. C'est le cas de certains systèmes commercialisés et désignés sous l'appellation d'aide au maintien dans la voie (lane keeping assistance). Ces systèmes appliquent une correction de trajectoire, typiquement en ligne droite sur autoroute, pour éviter toute dérive latérale involontaire. Plus récemment est apparue la notion de contrôle haptique partagé qui vise à produire une commande de l'automate qui s'insère en continu dans l'action du conducteur, idéalement en virages comme en lignes droites. La problématique principale de ces systèmes est de déterminer une stratégie de commande qui permette un mélange harmonieux de l'action des deux agents, ce qui implique un guidage du conducteur au travers des retours haptiques. Nous aurons l'occasion d'examiner en détail les enjeux liés à ce type de système en section 4.4. Quoi qu'il en soit, la distinction entre intervention ponctuelle sur critère et intervention continue dans la boucle de contrôle me semble suffisamment déterminante en termes de mode de coopération et de processus ciblés pour justifier une dissociation du contrôle partagé et du contrôle mutuel. Par ailleurs, la terminologie même de contrôle mutuel est ambiguë. J'éviterai donc de la reprendre par la suite.

La délégation de fonction consiste à confier à l'automate une part de l'activité de conduite, tout en laissant le reste sous le contrôle manuel du conducteur. Le régulateur de conduite

en est un très bon exemple : le conducteur indique une consigne de vitesse à l'automate qui prend en charge complètement la régulation du contrôle longitudinal, tout en laissant au conducteur le contrôle latéral et le contrôle tactique. Le mode tout automatique confie l'ensemble de la tâche de conduite à l'automate, le rôle du conducteur se résumant alors à celui de superviseur. Cette hypothèse, encore incertaine il y a une dizaine d'année, est devenue beaucoup plus crédible et une grande partie des travaux à venir porteront justement sur la question du rôle du conducteur superviseur au sein d'un véhicule autonome. Nous développerons quelques idées sur ce point dans la section 4.5 et en perspectives.

Pour récapituler cette tentative de classification des systèmes d'assistance, je propose une légère évolution de celle proposée dans Navarro et al. (2011) en abandonnant la notion de contrôle mutuel et en distinguant à part entière l'aide au diagnostic, l'amorçage du geste et le contrôle partagé. On aboutit donc à six catégories de systèmes :

- Mode intégré : action sur la dynamique véhicule sans coopération
- Perception augmentée : enrichissement de l'information sans interprétation
- Aide au diagnostic : information interprétée en fonction du contexte (avertissement ou suggestion d'action)
- Amorçage du geste : action ponctuelle sur les commandes pour faciliter l'initiation du mouvement
- Contrôle partagé : partage en continu des commandes
- Délégation de fonction : délégation partielle ou complète à l'automate supervisé

Bien entendu, l'exercice de catégorisation a ses limites. L'évolution de la technique peut amener à faire évoluer les frontières entre catégories et certains dispositifs peuvent être à la charnière entre deux classes. Par exemple, un système d'augmentation de la vision peut être considéré comme relevant de la perception augmentée, mais aussi comme une aide au diagnostic à partir du moment où il met en évidence un risque. De la même façon, un contrôle partagé où le système a une autorité importante sur les commandes se rapproche de la délégation de fonction. Il faut donc concevoir les tentatives de classifications comme la mise en exergue de grands principes de coopération. L'attribution d'un type de système à une classe souligne la modalité de coopération dominante, qui doit parfois être nuancée.

L'intérêt de la démarche de clarification est de pouvoir mieux pointer le type d'assistance à développer en fonction du niveau où s'opère le contrôle de l'activité. Dans le cas du contrôle de la direction du véhicule, cela revient à privilégier des systèmes qui agissent directement sur les processus perceptivo-moteurs. Or, la grande majorité des alertes aux sorties de voie, commercialisées ou étudiées comme objets de recherche, s'évertuent à assister le contrôle latéral sous la forme d'aide au diagnostic, non sans une certaine forme de succès, mais le pari qui a été fait dans l'ensemble des travaux que je vais présenter maintenant est que changer de paradigme en cherchant à agir au niveau sensorimoteur dégage des marges de progression significatives en termes de performance et de sécurité.

4.2 Perception augmentée : vers une aide visuelle au contrôle de la trajectoire

4.2.1 Les afficheurs tête-haute : conduire en réalité augmentée

Ces dernières années ont vu apparaître sur certains véhicules haut de gamme une technologie issue de l'aéronautique, celle des afficheurs tête-haute (HUD, pour Head-Up Display selon la terminologie anglophone). Ces dispositifs permettent de projeter sur le pare-brise des informations semi-transparentes qui se surimposent à la scène visuelle, moyennant une source lumineuse puissante et une optique d'accommodation (Figure 24). Actuellement, l'affichage permet de présenter dans un angle visuel relativement réduit des informations sur la vitesse et l'état du véhicule, ou encore des consignes de navigation. Il s'agit donc essentiellement de déplacer en position haute des éléments d'information symbolique, auparavant déjà disponibles sur le tableau de bord ou sur des dispositifs d'affichage en périphérie. L'avantage recherché est bien évidemment de minimiser les positions excentrées du regard qui diminuent la capacité du conducteur à traiter les informations de l'environnement extérieur.



Figure 24 : Les afficheurs tête-haute ou HUD : A. Principe de conception, B. Exemple d'afficheur de petite taille tel que ceux commercialisés actuellement, C et D. Deux exemples de prototypes grand angle utilisés comme assistance au guidage du véhicule.

Le potentiel des HUD en termes de réalité augmentée est bien plus important si on se place dans la perspective des dispositifs « grand angle » utilisant l'intégralité du pare-brise (Gabbard, Fitch, & Kim, 2014). De tels dispositifs sont encore au stade du développement, car ils posent de nombreux problèmes techniques pour que l'information projetée soit

collimatée à la bonne distance et apparaisse in fine en superposition exacte à l'objet réel auquel il s'applique. Des travaux portent par exemple sur la nécessité de mesurer la position de la tête pour compenser la parallaxe de mouvement (Halit, Kemeny, Le Gouguec, Mérienne, & Mohellebi, 2015). Cependant, il ne fait aucun doute que cette technologie émergera dans les années à venir et un certain nombre de travaux sont réalisés en anticipation pour concevoir de nouvelles interfaces. Les travaux les plus précurseurs sont certainement ceux conduits par l'Intelligent Transportation System Institute de l'Université du Minnesota (Ward et al., 2004; Ward, Parkes, & Crone, 1995). A l'aide de prototypes de HUD, leurs travaux ont cherché à faciliter la visualisation du trafic environnant (en conduite de nuit sur autoroute) ou le contrôle de la trajectoire (en chasse-neige, par exemple, en recréant artificiellement les bords de voie occultés par la neige).

Un des risques principaux associés au développement des HUD en automobile est de vouloir s'y accumuler les affichages d'informations certes pertinentes, mais qui, si elles sont trop nombreuses ou trop denses, pourraient encombrer la scène visuelle (Horrey, Wickens, & Alexander, 2003). Une façon d'aborder ce problème est de déterminer non seulement quelles sont les informations pertinentes à présenter au conducteur, mais aussi comment les présenter de façon économe, en termes de ressources de traitement de l'information à mobiliser par le conducteur. Plus particulièrement, nous allons nous intéresser dans les pages qui suivent aux informations qu'il serait utile de mettre en évidence dans la scène visuelle pour une aide au contrôle de la trajectoire en virage. Une solution maximaliste serait de recréer en réalité augmentée la totalité des bords de voie, par exemple, ce qui reviendrait à reconstruire la scène visuelle lorsque celle-ci est rendue moins accessible, en conduite de nuit ou par mauvais temps. Une solution minimaliste serait au contraire d'identifier et de mettre en évidence les indices visuels juste suffisants pour faciliter la tâche de conduite, ce qui faciliterait sa mise en œuvre technique et limiterait les risques d'encombrement visuel.

4.2.2 Guider le regard pour aider au contrôle de la trajectoire

Définir l'utilisation des afficheurs tête-haute pour l'assistance au contrôle de la trajectoire s'appuie naturellement sur la littérature évoquée dans la section 3.1.2. En effet, comprendre les relations fonctionnelles existant entre les stratégies visuelles du conducteur et le contrôle de la direction du véhicule reste la meilleure façon de spécifier quelle information mettre en évidence et avec quels bénéfices attendus. Une étude exploratoire sur la question, menée en collaboration avec Daniel Mestre, partait de ce principe (Mestre, Mars, Durand, Vienne, & Espié, 2004). L'hypothèse de départ était très simple : puisque la région située autour du point tangent en virage semble attirer une proportion importante des regards du conducteur, dans quelle mesure la mise en évidence de ce point dans la scène visuelle peut-elle guider le regard et, par la même, améliorer le contrôle du véhicule ? L'expérience a donc consisté à faire parcourir à des participants une succession de virages de courbures variées, avec ou sans indication de la position du point tangent sur le bord de voie intérieur. Aucune contrainte de positionnement du regard n'était imposée au sujet. Les résultats ont montré que la variabilité de la trajectoire était plus grande dans les virages à gauche que dans les virages à droite lorsque le point tangent n'était pas indiqué dans la scène visuelle. Cet effet peut s'expliquer de deux façons non-exclusives. Premièrement, même si la consigne était donnée au sujet de rester dans leur voie de circulation, il est possible que les sujets se soient autorisés plus d'excursions latérales vers le bord de voie intérieur, augmentant ainsi la variabilité de la position latérale, le risque de sortie de voie

étant plus pénalisé à droite (bas-côté) qu'à gauche (voie de circulation opposée). Il est possible également que cette asymétrie soit due au caractère discontinu de la ligne blanche centrale dans les virages à gauche, par opposition à la ligne continue du bord de route dans les virages à droite. Isoler le point tangent à partir du mouvement visuel de la ligne blanche discontinue pourrait être plus difficile. Cette hypothèse est soutenue par les observations oculométriques, le conducteur ayant tendance à « sauter » d'un des éléments qui forme la ligne discontinue au suivant dans les virages à gauche. Quoi qu'il en soit, l'asymétrie droite-gauche disparaît dès lors que le point tangent est mis en évidence dans la scène visuelle, en particulier pour les virages à forte courbure. Les résultats concernant le comportement oculomoteur des sujets montrent que le regard était positionné aux alentours du point tangent dans les deux cas (écart angulaire moyen : 4°). Les effets observés lorsque le point tangent était indiqué dans la scène visuelle sont relativement marginaux. Cette étude suggère donc que mettre en évidence le point tangent dans la scène visuelle peut influencer le contrôle latéral du véhicule, au moins pour les virages à gauche, sans toutefois influencer de façon marquée les stratégies de prise d'information visuelle.

Bien qu'elle ait été davantage conçue pour tester des hypothèses fondamentales sur le contrôle visuel de la trajectoire que pour répondre à la problématique de la conception des HUD, l'étude de Mars (2008a) apporte des éléments complémentaires de réflexions. Je ne reviens pas sur le détail des résultats obtenus (cf. 3.1.2), mais sur certaines de ses conclusions : suivre les évolutions d'une cible visuelle dont le déplacement latéral est fonction des changements de courbure de la route améliore assez nettement la stabilité du contrôle latéral, quelle que soit le sens du virage. Le point tangent ne semble pas procurer d'avantage spécifique. Ce serait plutôt le renforcement de la coordination visuo-manuelle qui améliorerait les performances. Ces résultats semblent donc indiquer que faire figurer une cible visuelle décrivant les changements de courbure de la route pourrait constituer une aide au contrôle de la trajectoire. Cependant, le suivi continu de la cible visuelle était imposé par consigne, contrairement à l'étude de Mestre et al. (2004). La question reste donc de savoir si le conducteur peut et souhaite utiliser spontanément une telle cible visuelle comme aide au contrôle de trajectoire. Par ailleurs, si l'aide visuelle est utilisée en situation normale de conduite, qu'en est-il lorsque le contrôle latéral est perturbé ? La cible en réalité augmentée peut-elle aider au retour à un état stable après une forte bourrasque de vent latéral, par exemple ? Enfin, on peut légitimement se demander si l'ajout d'un objet visuel saillant et en mouvement dans la scène visuelle ne risque pas d'attirer le regard et de modifier en conséquence la répartition des prises d'information lors de la conduite. Même si les influences descendantes sont loin d'être négligeables, il est bien connu que la distribution de l'attention spatiale est déterminée en partie par la saillance des stimuli visuels (Itti & Koch, 2001). Quant à la capture attentionnelle d'une cible en mouvement, Hillstrom et Yantis (1994) ont montré que le mouvement d'un objet ne capture l'attention que s'il est porteur d'information sur sa position future ou qu'il permet de distinguer l'objet parmi un ensemble d'objets. Par ailleurs, lorsque capture attentionnelle il y a, elle n'est que transitoire et n'intervient qu'immédiatement après l'initiation du mouvement. Ainsi, c'est le caractère de nouveauté que le mouvement attribue à l'objet qui capture l'attention, plus que le mouvement lui-même. Dans le cas qui nous intéresse, la dynamique de la cible visuelle ne permet pas de prédire l'évolution de sa position. Elle ne permet pas non plus de distinguer le point tangent parmi d'autres éléments ; elle permet tout au plus d'en augmenter la saillance. Quant au troisième point, la cible ne disparaît que lorsque le véhicule entre dans une ligne droite pour réapparaître 50 mètres avant le virage

qui suit. On peut donc raisonnablement s'attendre à ce que la cible ne capture le regard qu'occasionnellement et de façon transitoire sans modifier significativement les stratégies visuelles du conducteur.

Pour tenter de répondre à ces questions, Mars (2008b) a reproduit le paradigme de Mars (2008a), mais cette fois avec uniquement deux positionnements de la balise visuelle, le centre de la voie ou le point tangent. Une condition où la balise était présente dans la scène visuelle mais sans consigne explicite de la regarder (*consigne faible*) a été ajoutée aux conditions contrôle (*pas de cible*) et de suivi obligatoire de la balise (*consigne forte*). De plus, durant chaque tour, deux perturbations latérales étaient générées en ligne droite et en entrée de virage, à des positions imprévisibles du circuit. Une analyse oculométrique fine a été réalisée en plus de celle portant sur la stabilité du contrôle de trajectoire.

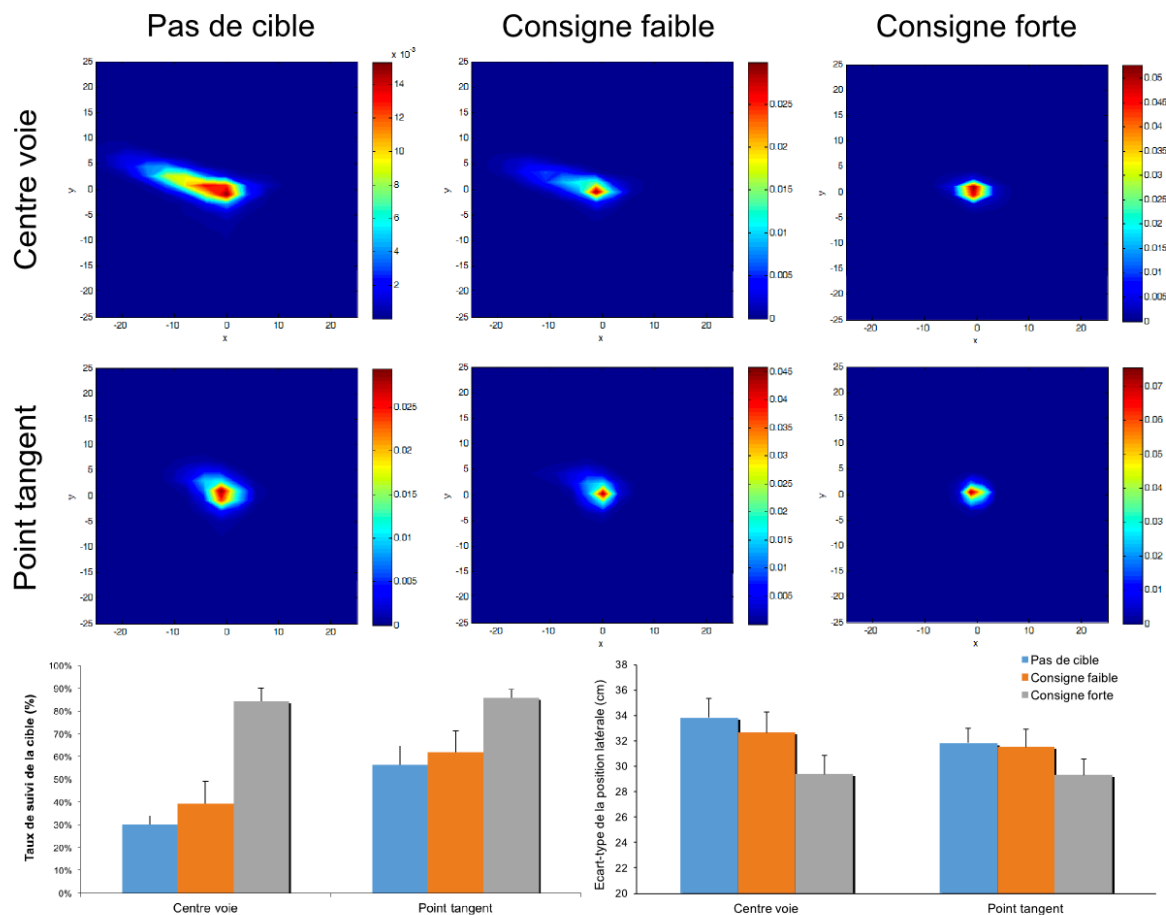


Figure 25 : Effet de la position de la cible et de la consigne dans l'expérience de Mars (2008b) : en haut, la densité de probabilité de la distribution du regard par rapport au point cible ; en bas à gauche, la proportion de temps passé à regarder à moins de 3° d'angle du point ; en bas à droite, la variabilité de l'écart latéral.

Les analyses oculométriques montrent que la présence de la cible dans la condition *consigne faible* modifie les stratégies visuelles habituellement adoptées, mais dans des proportions relativement faibles (Figure 25) par rapport à la condition *consigne forte*. Le temps passé à regarder la cible n'est significativement supérieur à la condition contrôle que dans lorsque la cible est positionnée au centre de la voie, mais, même dans ce cas, la taille de l'effet est modeste et les stratégies de prises d'information semblent globalement préservées. En miroir, on observe une très légère réduction de la variabilité du positionnement latéral, mais

bien moindre que celle observée dans la condition *consigne forte*. Les résultats observés suite aux perturbations latérales montrent que le contrôle du véhicule n'a été que très marginalement influencé par l'ajout de la cible dans la scène visuelle, quelle que soit sa position et la consigne de suivi qui était donné aux sujets. Aucune des différences observées suite aux perturbations n'étaient significatives.

Ainsi, les résultats confirment ceux rapportés dans Mars (2008a), à savoir que renforcer le couplage entre le contrôle du regard et le contrôle du volant par le biais du suivi d'une cible visuelle évoluant avec les changements de courbure de la route peut améliorer sensiblement la stabilité du contrôle de la trajectoire. Cependant, dans des conditions normales de visibilité, les conducteurs ne semblent pas tirer spontanément avantage de la présence d'un tel enrichissement de la scène visuelle. Ils ne semblent pas non plus montrer de capture attentionnelle substantielle. La question reste ouverte de savoir si ces bénéfices attendus d'une telle aide à la conduite apparaîtront lorsqu'elle sera mise en œuvre dans des conditions de visibilité réduite.

4.2.3 Vers une vision périphérique augmentée

Enrichir la scène visuelle pour guider le regard telle que nous venons de le voir consiste à alimenter la vision lointaine, celle qui est responsable de l'anticipation des changements de courbure de la route. Cette démarche pourrait être étendue à la vision périphérique afin d'alimenter la régulation à court terme de la position du véhicule dans sa voie. Il s'agirait de rechercher un indicateur de positionnement latéral mesuré au centre de gravité du véhicule, ou faiblement en amont, qui puisse être présenté en périphérie basse du pare-brise. Ainsi, l'aide visuelle à la conduite alimenterait les deux niveaux du contrôle visuel de la trajectoire (cf. 3.1.1). Le niveau prédictif bénéficierait de la figuration du point tangent en amont du véhicule. L'information du contrôle correctif transiterait quant à elle par la vision périphérique en partie basse du pare-brise. Les gains associés à chacune des informations augmentées, puis leur combinaison, pourraient être évalués en termes de facilitation de la conduite dans des situations de visibilité dégradée. Cette perspective aux travaux présentés ici est un exemple supplémentaire de conception d'interface dirigée par les modèles du contrôle sensorimoteur.

Au-delà de la question du contrôle de la trajectoire, l'exploitation de la vision périphérique pour transmettre des informations pertinentes à la réalisation de tâches dynamiques me semble être une source de recherche et de pistes de conception totalement inexploitées. Il ne s'agirait pas de chercher à transposer de la vision centrale vers la vision périphérique du contenu symbolique, mais plutôt de chercher à exploiter les propriétés perceptives spécifiques à la vision périphérique (en termes de perception du mouvement) pour fournir des informations utilisables de façon directe et univoque par le conducteur, sans apprentissage lié au contenu de l'information. Un exemple tiré de l'aéronautique est celui de l'horizon de Malcolm qui consistait à projeter l'indicateur d'assiette des aéronefs en périphérie du cockpit comme alternative aux horizons artificiels conventionnels (Malcolm, Anderson, Money, & Mandler, 1978). L'idée était de s'appuyer sur le rôle primordial de la vision périphérique dans la perception de l'orientation spatiale plutôt que de passer par le canal de l'interprétation d'information symbolique en vision centrale. Dans le domaine de la conduite automobile, les travaux de Milleville-Pennel (2008) forment également une bonne illustration. L'étude a cherché à recréer des sensations d'accélération latérale dans un simulateur à base fixe par le biais d'un indicateur visuel en vision périphérique. Il s'agissait

de deux bandes noires placées en haut et en bas de l'écran de visualisation qui s'inclinaient en fonction de l'accélération latérale théorique calculée par le modèle véhicule. Les résultats montrent que les conducteurs qui n'étaient pas informés de la présence de cet indicateur ne se rendaient pas compte de son existence, mais réduisait néanmoins leur vitesse en virage. A contrario, les conducteurs informés ne subissaient pas l'influence de l'indicateur, voire augmentaient légèrement leur vitesse. Cet exemple montre le potentiel de la vision périphérique à transmettre des informations dynamiques sur l'état du véhicule et sa relation à l'environnement. Il montre également les relations complexes entre les traitements implicites et explicites de ce type d'information. Ces aspects seront nécessairement à prendre en compte pour déterminer la faisabilité et les moyens de mise en œuvre d'assistances visuelles à la conduite présentées en périphérie du pare-brise.

4.3 L'amorçage haptique du geste de correction de trajectoire

Les travaux que je vais aborder maintenant ont été réalisés au travers des travaux doctoraux de Jordan Navarro et de Mathieu Deroo. Ils ne s'intéressent plus à la modalité visuelle, mais au meilleur moyen d'aider le conducteur au contrôle de la trajectoire par le biais de la modalité haptique. Plus qu'une question de modalité sensorielle sollicitée, la différence avec les travaux précédents réside surtout dans le mode de coopération qu'on cherche à établir entre le conducteur et le système d'assistance : il ne s'agit plus d'enrichir les sens, mais d'agir au niveau du système moteur en charge de l'exécution de la réponse.

4.3.1 Principe et définition de l'amorçage haptique

Cette ligne de recherche a pris sa source en 2004 dans le cadre du projet ARCOS, en collaboration avec le LIVIC (Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs). Le constat avait été posé que les assistances au contrôle latéral les plus couramment étudiées à l'époque se résumaient à deux classes de dispositifs : les alertes aux sorties de voie, qui avertissent le conducteur sans intervenir sur la direction du véhicule, et les aides au maintien dans la voie, qui agissent sur la colonne de direction pour guider le véhicule. Alors que les alertes sont supposées améliorer le diagnostic de la situation en informant le conducteur de l'état de son véhicule dans le monde, les aides au maintien dans la voie interviennent directement dans le contrôle du véhicule. Entre ces deux catégories de systèmes, la question s'est posée de savoir s'il était possible de suggérer une action au conducteur au travers du volant, mais sans agir directement sur la direction du véhicule. Je fus donc chargé de convertir ce principe en une réalité.

Mon idée de départ fut de chercher à générer une illusion de rotation du volant qui indiquerait directement aux mains la direction de la correction à apporter. Après avoir envisagé plusieurs solutions techniques, nous avons fait un ensemble d'essais sur piste dans lesquels nous avons fait varier la fréquence et le différentiel de vitesse d'oscillations asymétriques du volant. L'hypothèse était que le système haptique serait plus sensible aux phases rapides du mouvement qu'aux phases lentes, ce qui pourrait donner lieu à la perception d'un mouvement asymétrique. Les résultats furent mitigés, car la sensation n'était pas univoque pour tous les participants. Plutôt qu'un différentiel de vitesse, nous testâmes alors un différentiel de couple, plus clairement identifiable. L'assistance pris donc la forme d'oscillations du volant, rapides et de faibles amplitudes, intervenant lorsque le véhicule est sur le point de franchir un des bords de voie (Figure 26). Le couple délivré au

volant est plus important lorsque le mouvement est dirigé vers le centre de la voie que lors du mouvement retour. Le caractère asymétrique de la stimulation haptique donne la sensation d'un volant qui pousse légèrement dans la direction de la correction à apporter. Le différentiel de couple appliqué sur le volant pourrait en théorie générer une légère déviation de la trajectoire du véhicule. Dans les faits, les oscillations du volant sont en grande partie amorties par le maintien du volant, même léger, par le conducteur. En virage, le différentiel de couple devient négligeable comparativement aux forces nécessaires pour tourner le volant.

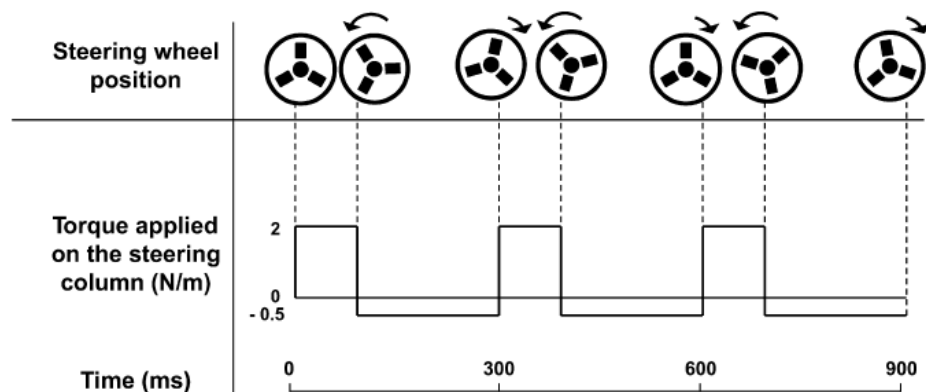


Figure 26 : Principe de l'amorçage haptique du geste par oscillations asymétriques du volant.

Le dispositif vise donc à provoquer une correction motrice plus efficace (nous verrons en quoi), sans action directe sur la trajectoire elle-même. Elle fournit un avertissement au conducteur sur la base d'un critère de risque et, ce faisant, comme n'importe quel dispositif d'avertissement traditionnel, est supposée améliorer le diagnostic de situation. Sa spécificité réside dans l'amorce du geste de correction, directement au niveau sensorimoteur, puisqu'il s'agit d'une stimulation orientée des afférences proprioceptives des bras. C'est pourquoi le dispositif fut baptisé amorçage moteur (*motor priming*). Plus tard, pour lever l'ambiguïté liée au terme « moteur » dans le contexte de l'automobile, la terminologie d'amorçage haptique lui fut préféré.

4.3.2 Amorçage haptique et diagnostic de la situation

La problématique fondamentale de ces travaux concerne le niveau d'intervention des assistances à la conduite dans les processus de contrôle du véhicule. Une alerte, quelle que soit sa forme et la modalité sensorielle par laquelle elle est délivrée, est une information d'ordre symbolique qui doit être reconnue, interprétée et associée à une règle d'action. En cela, elle alimente le diagnostic de la situation sans directement s'adresser au système effecteur de la réponse attendue. Intervenir au niveau de l'action, c'est faire l'économie de ces processus cognitifs et insérer l'intervention du dispositif dans la boucle de contrôle sensorimotrice du conducteur, ce qui peut donner lieu à des réponses plus rapides et plus efficaces, mais peut également occasionner des réponses d'opposition si l'intervention est perçue comme intrusive. Dans l'étude princeps de Navarro, Mars et Hoc (2007), nous avons posé pour la première fois l'hypothèse que l'amorçage haptique intervenait au niveau du contrôle de l'action en sollicitant le système sensorimoteur sans pour autant intervenir de manière directe sur la trajectoire du véhicule. Afin de vérifier cette hypothèse, cinq modalités d'assistance ont été comparées sur simulateur de conduite :

- un avertissement sonore latéralisé imitant le passage du véhicule sur une bande rugueuse : ce stimulus a été choisi car il forme une icône auditive facilement identifiable ;
- un avertissement vibratoire sur le volant (oscillations symétriques à 5 Hz), qui stimule l'effecteur de la réponse sans toutefois donner d'information sur la direction de la réponse à apporter ;
- la combinaison des deux avertissements, qui combine la stimulation tactile des mains et la latéralisation de l'information ;
- un amorçage haptique seul, qui adresse une information latéralisée au système moteur ;
- la combinaison d'un amorçage haptique et d'un avertissement sonore, qui associe le caractère iconique du son à l'amorce motrice.

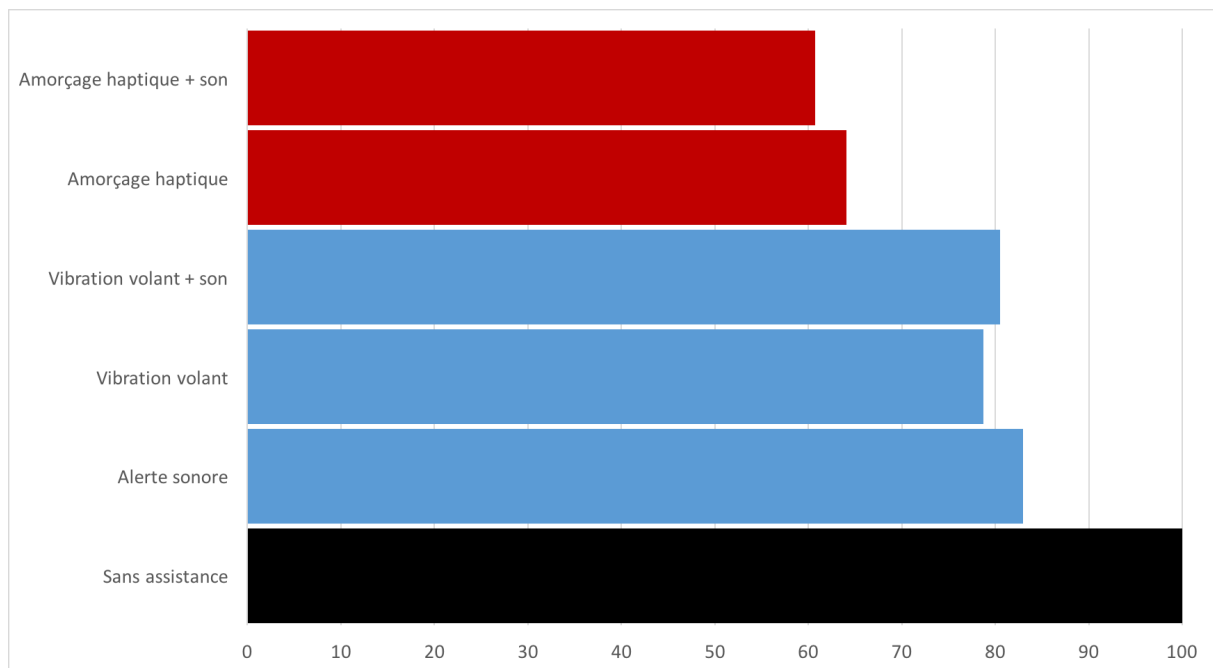


Figure 27 : Effet des différentes modalités d'assistance sur la durée de sortie de voie rapportés dans Navarro, Mars, & Hoc (2007). Les valeurs ont été converties en pourcentage de la durée observée dans la condition sans assistance (en noir). La réduction est de 20% environ avec les trois modalités d'avertissement (en bleu) et de 35 à 40% avec l'amorçage haptique (en rouge).

Les conducteurs étaient placés dans des situations critiques de sortie de voie, en virage et en ligne droite, lors d'un itinéraire sur route de campagne. Les situations critiques étaient provoquées de façon contrôlée par des occlusions visuelles. La réapparition de la scène visuelle, lorsque la sortie de voie était imminente, coïncidait avec le déclenchement de l'assistance. Le conducteur devait alors repositionner le véhicule au centre de sa voie. Les manœuvres ont été analysées au travers de différentes variables, dont la durée de sortie de voie qui témoignent du temps que les conducteurs ont passé dans une position sur la voie jugée dangereuse, les temps de réponse qui quantifie la réactivité du conducteur, et les pics d'accélération au volant qui reflètent la vivacité de la réponse.

Les résultats montrent que toutes les assistances réduisent les durées de sortie de voie, mais dans des proportions différentes (Figure 27). En virage par exemple, les avertissements - vibratoires, sonores ou combinés - réduisent les durées de sortie de voie de 400 ms environ par rapport à la condition sans assistance, alors la réduction approche les 800 ms avec

l'amorce haptique, qu'elle soit accompagnée de l'alerte sonore ou pas. Cet effet ne s'explique pas par une réduction des temps de réponse qui est de l'ordre de 100 ms pour toutes les assistances testées. En revanche, les pics d'accélération angulaire du volant s'avèrent plus élevés avec l'amorce haptique, ce qui témoigne d'une rotation plus franche du volant, sans être brutale car aucune sur-correction n'a été observée. Il semble donc que l'amorce haptique améliore l'exécution de la réponse une fois qu'elle est initiée. Ces résultats vérifient l'hypothèse qu'une assistance alimentant le système moteur en charge du contrôle du volant est plus efficace qu'une assistance alertant les conducteurs et nécessitant des traitements cognitifs de plus haut niveau.

L'équivalence des résultats obtenus avec les trois types d'avertissement suggère quelques réflexions complémentaires. Premièrement, la latéralisation de l'information, pas plus que la modalité sensorielle qui la traite, n'a de réelle importance. Suzuki et Jansson (2003) avaient abouti à la même conclusion en montrant qu'un avertissement sonore à la sortie de voie produit les mêmes bénéfices en mono et en stéréo. Il semble donc que la fonction de l'avertissement est d'inciter le conducteur à effectuer un diagnostic de la situation. La décision d'action s'effectue essentiellement sur la base de l'analyse de la scène visuelle, quelle que soit la forme de l'avertissement. Pour la même raison, aucun bénéfice n'est associé aux dispositifs multimodaux, lorsque le son était associé à la vibration du volant ou à l'amorce haptique. Le bénéfice associé à la redondance sensorielle tel qu'il peut s'observer dans d'autres types de tâches (Wickens & Gosney, 2003) ne s'applique pas, y compris lorsque le son fournit une information directionnelle qui complète la stimulation vibratoire des mains.

Dans l'objectif d'affiner la compréhension des mécanismes sous-jacents à l'effet de l'amorçage moteur, une seconde expérimentation réalisée en collaboration avec Renault a dissocié les différents éléments qui caractérisent ce type d'assistance et a cherché à déterminer l'importance relative de chacun (Navarro, Mars, Forzy, El-Jaafari, & Hoc, 2010). A cet effet, les modes d'assistance suivants ont été étudiés :

- un avertissement sonore latéralisé : stimulation sonore, déportée de l'effecteur, identique à celle de l'expérience précédente ;
- un avertissement latéralisé sur le siège : stimulation vibratoire déportée de l'effecteur. Seule la partie du siège située du côté de la sortie de voie vibrait ;
- un avertissement latéralisé au volant : stimulation vibratoire au niveau de l'effecteur. Seule la moitié du volant du côté de la sortie de voie vibrait ;
- un amorçage haptique, similaire à celui de l'expérience précédente ;
- la combinaison de l'amorçage haptique et de l'avertissement sonore.

Cette étude se distingue de celle de Navarro et al. (2007) par l'utilisation du simulateur à base mobile CARDS 2 de Renault et par l'utilisation d'une tâche distractive pour générer les sorties de voie. Surtout, elle permet par une série de comparaison en cascade de mieux cerner la nature des bénéfices associés à l'amorçage haptique. La vibration au volant, parce qu'elle est latéralisée et délivrée au volant, ne se distingue de l'amorçage haptique que par l'absence de l'impulsion délivrée au système neuromusculaire. La vibration du siège ne se distingue de la vibration au volant que parce qu'elle n'est pas délivrée au niveau de l'effecteur de la réponse. Quant à la comparaison entre l'avertissement sonore et l'avertissement sur le siège, elle renseigne sur un éventuel bénéfice à transmettre

l'information directionnelle par le biais de la modalité haptique. La méthode de distraction ayant provoqué des sorties de voie à la fois plus variables et plus importante que la méthode des occlusions visuelles, les bénéfices associés aux assistances à la conduite sont globalement plus faibles de l'ordre de 25% par rapport à ceux de Navarro et al. (2007). Cependant, la configuration des résultats est similaire dans les deux études. Ils confirment la plus grande efficacité de l'amorçage haptique, avec ou sans son associé, comparativement aux autres assistances, qui ne se distinguent pas entre elles en termes de durée de sortie de voie comme en termes de vivacité de la réponse. Tout au plus observe-t-on un effet spécifique à la stimulation des mains sur les temps de réaction puisque la vibration latéralisée au volant tout comme l'amorçage haptique diminue de 50 ms supplémentaires environ le temps d'initiation de la réponse. En conséquence, le bénéfice de l'amorçage haptique en termes de sécurité semble bien résider essentiellement dans sa capacité à alimenter directement le niveau sensorimoteur du contrôle du geste. Nous évoquerons plus tard (cf. 4.2.5) un autre pan des résultats présentés dans Navarro et al. (2010) qui portent sur l'acceptabilité des différents modes d'assistance étudiés en rapport avec leurs effets sur la performance de conduite.

4.3.3 Modulation et inhibition de l'amorçage haptique

L'hypothèse selon laquelle l'efficacité accrue de l'amorçage haptique du geste de correction dépend de son intervention au niveau sensorimoteur pose la question de la modulation, voire de l'inhibition des effets de cet amorçage lorsque cela est nécessaire, en particulier lorsque le diagnostic de la situation s'accorde mal avec l'action suggérée. La question s'avère d'autant plus pertinente que Kullack, Ehrenpfordt, Lemmer et Eggert (2008) proposent un système d'assistance à la conduite, dénommé *ReflektAS*, recherchant les mêmes effets que l'amorçage haptique mais sous-tendu par un principe d'action conceptuellement opposé. Là où l'amorçage haptique est considéré comme une activation du geste à effectuer, le *ReflektAS* vise à provoquer une réponse stéréotypée et irrésistible dans le sens opposé à la stimulation. L'indice haptique est donc délivré dans la direction de la sortie de voie de sorte à induire une réponse dans le sens opposé. Les auteurs rapportent des temps de réaction plus courts avec ce dispositif et une amélioration des manœuvres de sortie de voie par rapport à une condition sans assistance.

Cette question de la capacité des conducteurs à moduler ou inhiber l'action de tels dispositifs a été étudiée dans le cadre de deux expérimentations. En premier lieu, il s'agissait d'évaluer la modulation des effets du dispositif par l'évaluation des risques liés aux sorties de voie. Une seconde expérience a étudié la capacité des conducteurs à inhiber les effets du dispositif lorsque celui-ci amorce une correction dans une direction inappropriée.

Les deux expériences ont en commun d'analyser les caractéristiques de manœuvres d'évitement de sorties de voie, celle-ci ayant été provoquées par des occlusions temporaires de la scène visuelle. L'amorçage moteur se déclenchait en anticipation de la sortie de voie, selon deux degrés d'intensité. Bien qu'il soit difficile d'évaluer l'amplitude qu'il serait nécessaire de donner aux impulsions au volant pour qu'elles déclenchent des réponses d'ordre réflexe (Cooke, 1980), on peut faire l'hypothèse que des impulsions sous le seuil de déclenchement du réflexe serait perçue comme un indice haptique, une incitation à effectuer le mouvement, alors que des impulsions plus fortes déclencherait une réponse réflexe compensatoire, dans le sens opposé à la stimulation. C'est pourquoi nous avons testé un

amorçage léger (2 N/m), comparable à celui utilisé dans nos expériences précédentes, et un amorçage fort (6N/m), plus proche des valeurs rapportées par Kullack et al. (2008).

Dans la première expérimentation, une indication du risque encouru était présentée durant les occlusions visuelles (Deroo, Hoc, & Mars, 2012). Ce risque pouvait être indiqué comme mineur ou majeur sous la forme d'une information textuelle délivrée pendant les occlusions visuelles. Dans le cas de risque majeur, des cônes de chantier, confirmant l'indication précédente, apparaissaient également en bord de voie lorsque la vision de la scène était rendue au conducteur (Figure 28). Les résultats montrent en substance que la perception du risque influence l'exécution de la manœuvre de correction, y compris avec l'amorçage du geste. L'effet du risque s'additionne à celui de l'assistance, sans interaction, lorsqu'on analyse les mouvements de volant (pic de vitesse et amplitude) et la durée de l'excursion latérale en position critique. En revanche, le risque perçu n'a aucune influence sur les temps de réponse. Sur la base de ces résultats, on estime que l'effet du risque perçu ne s'observe qu'à partir d'environ 750 ms après la fin de l'occlusion visuelle, soit après l'initiation de la réponse mais avant le pic de vitesse de la rotation du volant. L'amélioration des temps de réponse induit par l'assistance semble donc uniquement dépendre de son action au niveau sensorimoteur. Les processus cognitifs de plus haut niveau n'influencent l'exécution de la réponse qu'une fois qu'elle a commencé à être mise en œuvre.

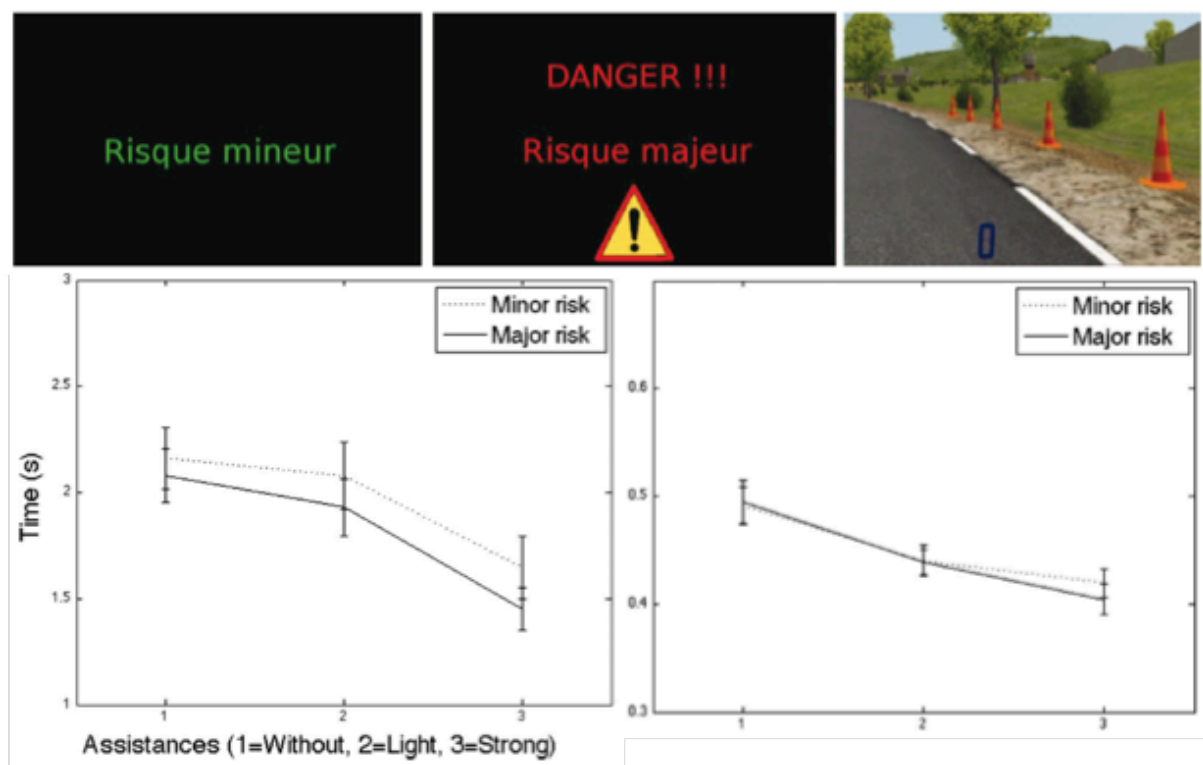


Figure 28 : Effets combinés du risque perçu et de l'amorçage haptique du geste dans l'expérience de Deroo et al. (2012). En haut, la méthode d'induction du niveau de risque perçu. En bas, représentation de la modulation de l'effet de l'amorçage sur la durée de l'excursion latérale par le risque (à gauche), alors que les temps de réponse dépendent uniquement de la présence ou non de l'amorçage (à droite).

Dans la seconde expérimentation, le sens de l'amorçage délivré était manipulé (Deroo, Hoc, & Mars, 2013). Dans la moitié des cas, le dispositif délivrait un indice haptique cohérent avec la direction de la réponse à apporter (amorce ipsilatérale). Dans les autres essais, l'amorçage était inversé, donc en direction de la sortie de voie, conformément à la logique du *ReflektAS*

(amorçe controlatérale). Les résultats montrent que, quelque soient la force et la direction de l'amorçe, les conducteurs tournent le volant dans la bonne direction, prenant en compte les informations contextuelles fournies par la scène visuelle. Aucune contre-réaction n'a été observée, même à l'initiation de la réponse, ce qui contredit totalement l'idée qu'un amorçe haptique puisse induire des réponses involontaires et stéréotypées dans le sens opposé à la stimulation. Une micro-réponse réflexe myotatique ne peut être exclue sans mesure électromyographique. Cependant, si une telle réponse existe, elle n'a aucun effet observable sur le comportement.

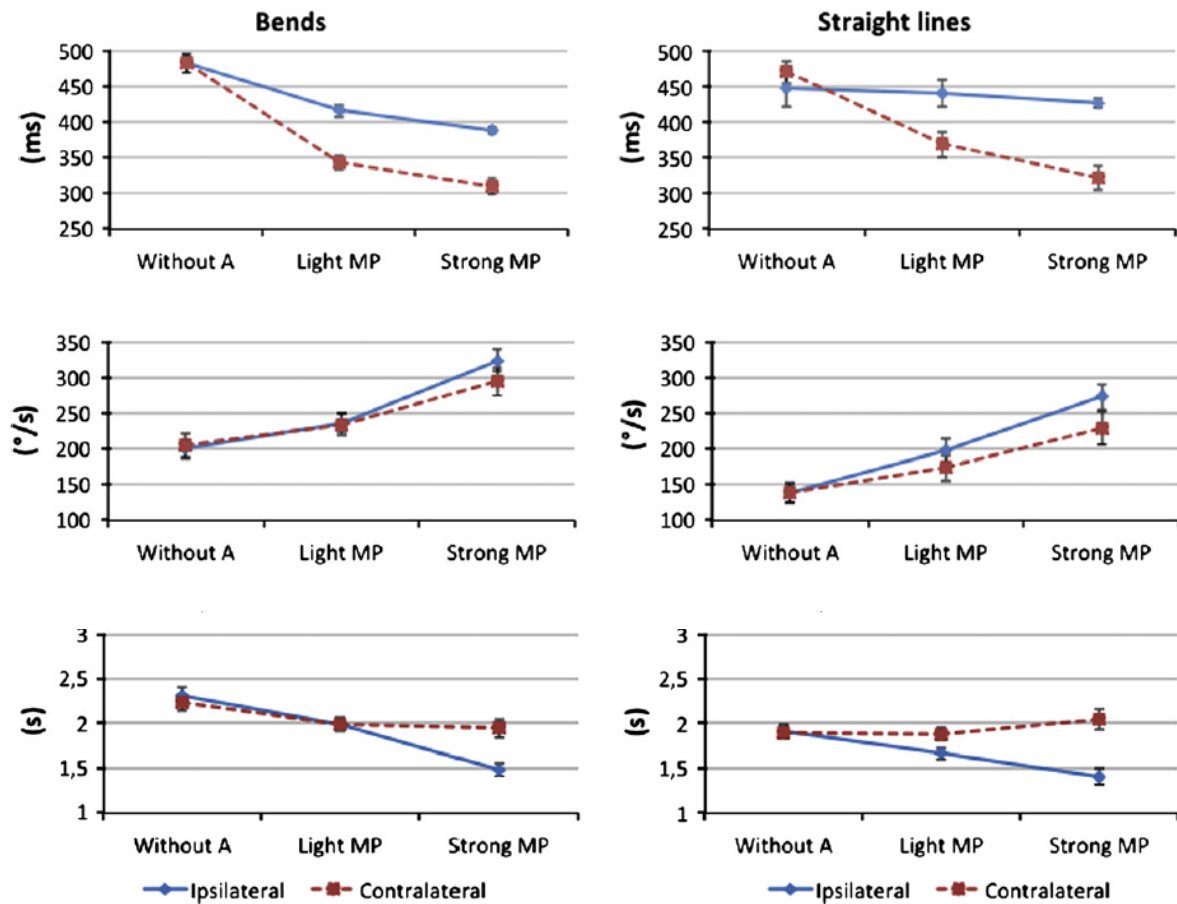


Figure 29 : Effets d'un amorçe haptique du geste dans le sens de la correction à apporter (ipsilatéral) ou dans le sens opposé (controlatéral) sur les temps de réponse (haut), les pics de vitesse au volant (milieu) et la durée des sorties de voie (bas), en virages (gauche) et en lignes droites.

Paradoxalement, les amorces controlatérales donnent lieu à des temps de réaction inférieurs aux amorces ipsilatérales, mais le bénéfice en termes de temps de sortie de voie montre le profil inverse (Figure 29). L'analyse des pics de vitesse au volant confirme que la réponse est plus efficace avec l'amorçe ipsilatérale. Les résultats s'accordent donc dans une certaine mesure avec les observations de Kullack et al. (2008), en ce qui concerne les temps de réaction, mais pas avec leur interprétation. Nos résultats montrent qu'un amorçe ipsilatéral améliore davantage la phase d'exécution de la réponse et que la prise en compte du contexte permet d'inhiber la réponse suggérée par le système en cas d'amorçe controlatérale.

La réduction importante des temps de réponse avec l'amorçe controlatérale appelle une explication complémentaire. Il convient en premier lieu de noter qu'aucun sujet n'a rapporté avoir perçu que la stimulation était inversée. Il semblerait donc que la détection de la

discordance entre le sens de l'indice haptique et la perception visuelle de la direction de la sortie de voie s'opère à un niveau de contrôle implicite et appelle une réponse plus immédiate encore que lorsque le geste est amorcé dans la bonne direction. Cependant, nos travaux illustrent parfaitement bien le fait que l'évaluation d'une assistance à la conduite ne peut se réduire à une question de temps de réaction. L'amorce haptique conçue comme une aide à l'exécution du geste lorsqu'il est initié plutôt que comme un stimulus provoquant une réponse stéréotypée reste la meilleure stratégie d'assistance à adopter.

4.3.4 Amorçage haptique et préparation motrice

L'amorçage haptique a été conçu comme une aide à l'exécution du geste de correction. De fait, les résultats présentés précédemment, et en particulier le fait que l'amélioration de la réponse s'observe plus par une augmentation du pic d'accélération angulaire du volant que par une diminution du temps de réaction, confirment que c'est bien la phase d'exécution et non sa préparation qui est influencée. Cependant, il est important de noter que l'effet de l'amorçage haptique du geste a été testé dans des conditions critiques où la réponse de correction devait être exécutée immédiatement, sans qu'aucun indice préliminaire ne soit délivré. Dans une expérience réalisée récemment (Frissen & Mars, en préparation), nous avons cherché à déterminer s'il était possible d'améliorer les temps de réponse par une stimulation de même nature que l'amorçage haptique mais présentée de façon anticipée à une deuxième stimulation qui, elle, serait impérative. En d'autres termes, il s'agissait de déterminer si une amélioration de la préparation motrice peut s'ajouter aux bénéfices déjà mis en évidence lors de la phase d'exécution du mouvement.

Il est connu depuis longtemps qu'une information anticipée sur la nature d'un mouvement à effectuer, sa direction ou son amplitude par exemple, réduit le temps d'initiation du mouvement (Leonard, 1958). Cet effet s'interprète comme la conséquence de la réduction de l'incertitude sur les paramètres du mouvement à réaliser, ce qui en améliore la préparation. Le protocole expérimental le plus classique pour étudier cette problématique est celui de l'amorçage de la réponse tel qu'il a été introduit par Rosenbaum & Kornblum (1982). Ce paradigme expérimental consiste à fournir au participant un indice anticipé (ou pré-indice) sur le mouvement à exécuter. Si l'indice est valide, le temps de réaction au signal impératif qui déclenche le mouvement est réduit par rapport à un indice neutre (non-informatif). Si, au contraire, l'indice est invalide, le temps de réaction est augmenté. L'effet de validité résiderait dans la préparation par le système moteur des paramètres du mouvement à exécuter. L'augmentation du temps de réaction en cas d'invalidité reflèterait le coût associé à la respcification des paramètres du programme moteur. Récemment, Hofmann & Rinkenauer (2013) ont cherché à transposer ce paradigme dans le contexte de la conduite automobile. Ils ont montré l'existence d'effets de validité et d'invalidité dans une tâche de changement de voie de circulation où les conducteurs recevaient un indice visuel sur la direction du mouvement de volant à effectuer.

Sur la base de ce constat, nous avons cherché à déterminer si cet effet est également valable avec un indice haptique directionnel similaire à celui délivré par le dispositif d'amorçage moteur. Le stimulus haptique utilisé différait cependant de l'amorçage tel qu'il a été étudié jusqu'ici, car seule une impulsion était délivrée et non pas un train d'impulsions jusqu'à complétion de la manœuvre. En effet, l'enjeu ici était de sonder spécifiquement l'étape de préparation motrice et non pas l'influence du système sur la réalisation de l'action de correction de trajectoire. Deux expériences ont été réalisées dans lesquelles un pré-indice

était délivré entre 300 et 1200 ms avant le signal impératif. La première expérience comparait indices visuels et indices haptiques dans une tâche de changement de voie. La seconde s'est intéressée à l'indiciage intermodalitaire où un signal visuel préparait une réponse déclenchée par un signal haptique et vice-versa.

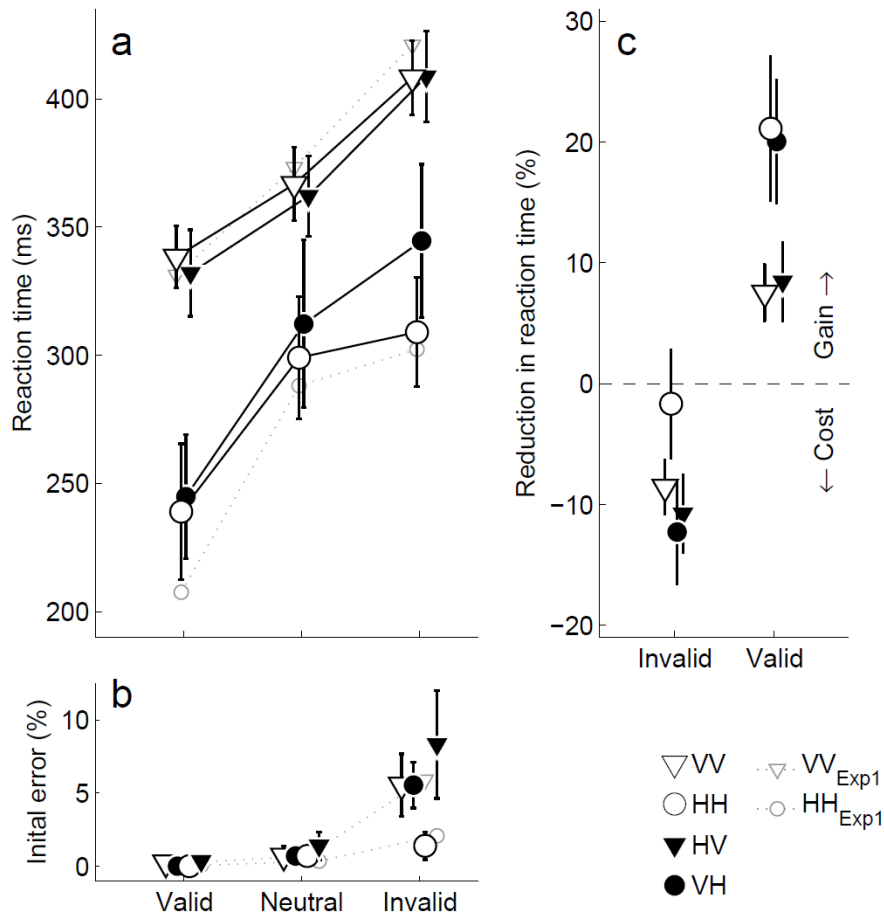


Figure 30 : Effet de la modalité sensorielle (H = haptique ; V = visuelle) de l'indice préparatoire (premier terme de la légende) et du signal impératif (deuxième terme) sur les temps de réaction et les erreurs de direction du mouvement à l'initiation du changement de voie. VV_{Exp1} et HH_{Exp1} correspondent aux résultats de l'expérience 1 (amorçages intramodaux uniquement), répliqués dans l'expérience 2 (ajout des amorçages intermodalitaires).

L'analyse de la première expérience montre que l'effet de validité est bien présent dans la modalité haptique comme dans la modalité visuelle : un indice correct sur la direction de la voie de circulation à atteindre réduit les temps de réaction. Si l'indice est invalide, on observe une augmentation des temps de réaction, accompagnée d'une augmentation des erreurs dans la direction du mouvement à effectuer (en particulier pour des temps interstimuli courts, jusqu'à 600 ms), mais uniquement pour la modalité visuelle. Les effets disparaissent lorsque les signaux sont délivrés par la modalité haptique. Plus intéressant encore, dans la seconde expérience où pré-indice et signal impératif étaient délivrés dans des modalités sensorielles différentes, il apparaît que c'est la modalité du signal impératif qui détermine les performances globales : les temps de réaction au signal impératif sont significativement plus faibles lorsque celui-ci est délivré par la modalité haptique, quel que

soit la modalité de l'indice préparatoire (Figure 30). D'autre part, l'effet d'invalidité ne disparaît que lorsque les deux signaux sont délivrés par la modalité haptique.

Ces résultats suggèrent qu'un indice haptique délivré en anticipation d'une réponse motrice à apporter au volant améliore la préparation de l'action au même titre qu'un indice visuel. L'information permettant de réduire l'incertitude du mouvement planifié est utilisée pour la préparation motrice de la même façon quelle que soit la modalité sensorielle. Par ailleurs, un indice haptique impératif donne lieu à des temps de réaction nettement inférieurs à un indice visuel, ce qui suggère un avantage de la modalité haptique pour la détection et/ou l'identification de l'information qu'elle porte (Jordan, 1972). Cependant, le résultat remarquable, observé dans les deux expérimentations, est l'absence d'effet d'invalidité lorsqu'à la fois le pré-indice et l'indice impératif sont de nature haptique. En d'autres mots, il apparaît qu'un signal impératif haptique qui spécifie la direction du mouvement à réaliser annule l'effet de la préparation motrice induit par un pré-indice de même nature, alors que cet effet se maintient si le pré-indice est une information visuelle symbolique. Une explication assez spéculative serait que la préparation motrice aurait une composante cognitive et une composante plus sensorimotrice. L'indication haptique agirait principalement à ce dernier niveau et toute nouvelle information annulerait l'information antérieurement perçue. Au contraire, la composante cognitive, fortement sollicitée par l'identification de l'indice visuel, garderait son influence sur le déclenchement de la réponse.

Ainsi, les bénéfices associés à l'amorçage haptique trouveraient leur explication au niveau sensorimoteur, non seulement lors de l'exécution de la réponse, mais aussi au moment de son déclenchement, de par la rapidité des réactions induites et sa capacité à annuler, au moins en partie, les effets d'une préparation motrice erronée.

4.3.5 Acceptabilité de l'amorçage haptique

L'intervention de l'amorçage haptique au niveau sensorimoteur pose la question de son acceptation par le conducteur. Même si l'assistance n'a de fait aucun effet direct sur le contrôle de la trajectoire du véhicule, elle agit sur l'organe de commande. De plus, on peut raisonnablement faire l'hypothèse que plus on agit bas dans la hiérarchie des niveaux de contrôle, plus la stimulation peut être perçue comme intrusive, voire dangereuse. Si on considère un cas extrême tel que le *ReflektAS* qui, rappelons-le, reposerait sur le principe du déclenchement d'une réponse irrépressible, il est probable que la plupart des conducteurs seraient réticents à l'idée de perdre le contrôle volontaire du volant, ne serait-ce que pour un court instant. L'amorçage haptique du geste ne va pas jusqu'à cette extrémité et nous avons même démontré que le conducteur restait dans tous les cas de figure capable d'inhiber l'exécution du geste de correction suggéré (Deroo et al., 2013). Cependant, solliciter le contrôle sensorimoteur par le biais de la modalité haptique pourrait donner lieu à la perception d'une plus grande intrusivité dans l'activité de conduite, ce qui diminuerait en conséquence l'acceptabilité de tels dispositifs.

Cette question a été étudiée dans l'étude de Navarro et al. (2010). L'acceptabilité des cinq modalités d'assistance étudiées (cf. 4.2.2) a été évaluée à l'aide d'un classement par rang de préférence, ainsi qu'au travers de l'analyse de verbalisations post-expérimentales (sur ce dernier point en particulier, voir aussi El-Jaafari, Forzy, Navarro, Mars, & Hoc, 2008). En plus de l'hypothèse de la faible acceptabilité de l'amorçage haptique a été posée celle d'une plus forte acceptabilité de l'avertissement sonore, de par le caractère familier et iconique du bruit de bandes rugueuses qu'il restituait. Cela nous a conduit à également évaluer une

association de ces deux informations avec l'idée de combiner le meilleur des deux mondes : l'amorce haptique pour son efficacité à faciliter la réponse au volant et l'avertissement sonore pour rendre l'assistance acceptable. En dépit d'une très grande variabilité interindividuelle, l'analyse des données subjectives tend à valider ces hypothèses et par là même le fait que l'efficacité d'un système n'est pas le meilleur prédicteur de son acceptabilité (Tijerina, Ho, Cummings, Kochhar, & Wang, 2006). Le classement par rangs révèle que l'avertissement sonore est l'assistance préférée des conducteurs, tandis que l'amorçage haptique est la moins appréciée (Figure 31). Les autres dispositifs obtiennent des scores intermédiaires. C'est le cas pour la vibration au volant, la vibration du siège et la combinaison de l'amorçage haptique et du son. En cela, cette dernière configuration semble être un bon compromis entre performance et acceptabilité. Ceci est d'autant plus vrai que l'analyse des verbalisations pointe un défaut de synchronisation perçue entre les signaux auditifs et haptiques. En effet, si les deux signaux démarraient bien au même instant, leurs fréquences diffèrent. Or, la qualité de l'intégration audio-haptique varie selon le degré d'asynchronie des deux informations (Bresciani et al., 2005). Concernant l'amorce haptique prise isolément, les verbalisations montrent une utilité perçue relativement bonne, mais le caractère intrusif du système a été mentionné par environ 40% des participants avec, chez certains, un sentiment de perte de contrôle tel qu'on peut le trouver avec les limiteurs ou les régulateurs de vitesse (Comte, Wardman, & Whelan, 2000; Young & Regan, 2007).

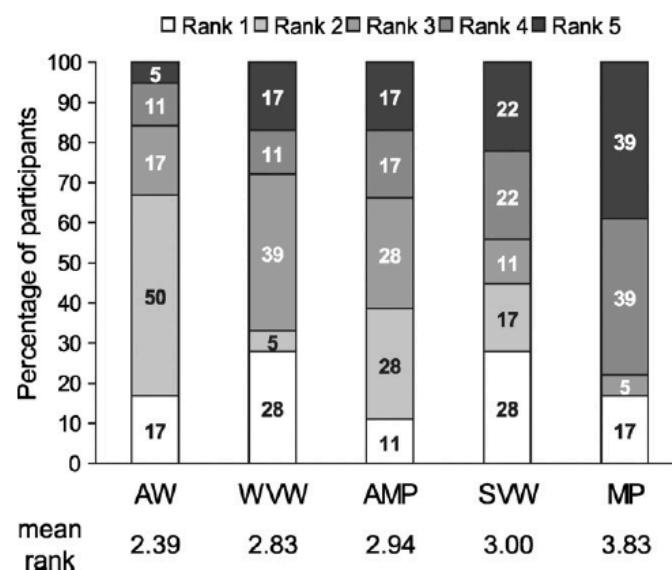


Figure 31 : Classement par rang des modalités d'assistance étudiées dans Navarro et al. (2010) de la modalité ayant été préférée à la modalité ayant été la moins bien estimée. Plus le rang accordé est faible, meilleure est l'acceptation. AW = avertissement sonore ; WVV = vibration du volant ; AMP = amorçage haptique + son ; SVW = vibration du siège ; MP = amorçage haptique seul

Améliorer l'acceptabilité de l'amorçage haptique par la redondance multisensorielle est une piste de recherche envisageable, mais probablement pas la seule. Les propriétés de la stimulation haptique sont elles-mêmes tout à fait déterminantes. C'est ce que suggère une étude récente de Huang, Wu et Liu (2015). Dans le prolongement direct de nos travaux, les auteurs ont manipulé de façon croisée la force, la fréquence et la forme des impulsions de couple délivrées au volant. Leurs résultats montrent de meilleurs résultats en termes de performance pour une stimulation à fronts carrés (similaire à la nôtre, cf. Figure 26) que

pour des impulsions triangulaires plus progressives, avec une acceptabilité similaire dans les deux cas. Plus l'amplitude des impulsions est élevée, meilleure est la performance, mais l'acceptabilité en pâtit. La fréquence de la stimulation semble avoir un effet négligeable sur la performance, alors que l'acceptabilité semble meilleure pour une fréquence intermédiaire de 10 Hz, comparativement à une stimulation de 3 Hz ou de 20 Hz. Ces résultats plaident donc pour des paramètres de stimulation similaires à ceux que nous avons déterminés de façon empirique, mais avec une fréquence plus élevée.

Pour conclure sur ce point, il convient de s'interroger sur le statut même d'une assistance à la conduite telle que l'amorçage haptique du geste. S'il est considéré comme un système d'alerte au franchissement de voix susceptible d'intervenir fréquemment lors de la conduite, la question de l'acceptabilité du dispositif est critique. Or, force est de constater que ce qui augmente le gain en termes d'exécution de la réponse de correction à apporter, en particulier l'amplitude des impulsions de couple, se fait au détriment de l'acceptabilité. On peut donc légitimement se poser la question de la pertinence de ce type d'application de l'amorçage haptique. Si, au contraire, l'amorçage n'intervient que très rarement, en dernier recours avant la sortie de voie, le système pourrait être considéré davantage comme un système de sécurité où l'efficacité pourrait être jugée comme plus déterminante que la perception de son caractère intrusif. La question dans ce cas est de savoir s'il y a intérêt, alors qu'on s'approche dangereusement de l'accident, à laisser le conducteur en charge du contrôle du véhicule plutôt que de la confier entièrement à un système automatique.

4.4 Le contrôle partagé de la direction

Les travaux qui suivent portent sur le développement d'une fonction d'aide active au suivi de voie réalisant un contrôle partagé de la direction du véhicule avec le conducteur. Tout comme pour l'amorçage haptique du geste, la coopération entre le conducteur et l'automate se fait au travers du volant et passe par la modalité haptique. En revanche, le contrôle partagé intervient en continu lors de la conduite, et non pas ponctuellement sur un critère de risque donné. Les questions de recherche associées concernent donc la façon dont l'action de l'automate s'insère de façon fluide dans l'action du conducteur. Au niveau fondamental, les questions abordées concernent la modélisation du contrôle de la trajectoire chez l'humain comme élément structurant des lois de commande de l'automate, mais aussi l'évaluation de la qualité de la coopération et les processus adaptatifs mis en jeu par le conducteur au fil de l'usage.

4.4.1 La problématique du contrôle partagé

Le principe du contrôle partagé de la direction consiste à faire coopérer le conducteur avec un automate qui acquiert de l'information de l'environnement, calcule l'action adéquate pour maintenir le véhicule dans la voie et applique une partie du couple nécessaire au volant, à charge au conducteur de produire l'effort manquant. Le dispositif aide au maintien dans la voie en agissant comme un copilote dont l'action augmente graduellement lorsque le véhicule s'écarte de la trajectoire de référence ou de l'action préconisée par la loi de commande. La métaphore la plus simple pour bien se représenter l'action du système est celle d'un ressort virtuel créé entre le véhicule et la trajectoire de référence (Griffiths & Gillespie, 2005). Plus que la réduction de l'effort que le conducteur doit fournir, l'assistance réside dans le guidage haptique qu'il fournit au conducteur. Pour autant, le conducteur reste

seul maître de sa conduite : l'action de l'automate est limitée, pas nécessairement suffisante pour maintenir le véhicule dans la voie, et elle doit pouvoir être aisément surmontable par le conducteur. Le gradient de force et la facilité à contrer le système dépendent de la stratégie de commande (planification de la trajectoire ou calcul d'effort, avec ou sans prédiction de l'action du conducteur, etc.) et, pour une stratégie donnée, du réglage du contrôleur (plus ou moins grande tolérance à l'erreur, etc.).

Les bénéfices associés au contrôle partagé de la direction ont été démontrés à plusieurs reprises (pour une synthèse, voir Abbink, Mulder, & Boer, 2012). Ils s'observent tout d'abord sur des indicateurs de la tâche primaire de conduite, comme le positionnement latéral et le contrôle du volant (Blaschke, Breyer, Färber, Freyer, & Limbacher, 2009; Marchal-Crespo, McHughen, Cramer, & Reinkensmeyer, 2010; Mulder, Abbink, & Boer, 2008, 2012), mais aussi sur les temps de réaction ou la charge mentale associée à la réalisation de tâches secondaires (Griffiths & Gillespie, 2004, 2005). Il a aussi été proposé qu'en facilitant la réalisation de la tâche sans prendre totalement le contrôle de la direction, le contrôle partagé permette d'éviter le syndrome de l'humain hors de la boucle (complaisance, perte d'habileté et difficulté à la reprise en main).

Cependant, des problèmes de coopération ont pu être rapportés. L'évitement d'obstacle, qui implique un écart latéral important, peut être rendu plus difficile par la résistance du système à la manœuvre (Griffiths & Gillespie, 2005). Des efforts au volant plus importants, des oscillations dans le contrôle et la sensation d'être « envahi » par le système ont également été rapportés, en particulier lorsque des gains élevés étaient appliqués au contrôleur (Forsyth & MacLean, 2006; Mulder et al., 2008; Tsoi, Mulder, & Abbink, 2010). De fait, la question de la répartition du contrôle entre le conducteur et l'automate est une question cruciale pour la conception de ces systèmes. La modulation de cette répartition en fonction du contexte en est une autre. Enfin, la question de l'adaptation du comportement du conducteur au fil de l'usage est une autre problématique jusqu'ici largement inexplorée. Les travaux que je vais présenter maintenant cherchent précisément à répondre à ces trois questions.

4.4.2 A la recherche du meilleur partage entre conducteur et automate

Une première expérimentation a cherché à développer une méthodologie d'évaluation de la performance du système homme-machine en vue de déterminer la meilleure répartition possible du contrôle entre l'homme et l'automate (Mars, Deroo, & Hoc, 2014). La question du meilleur équilibre possible entre les deux agents renvoie à la notion d'autorité haptique proposée par Abbink et al. (2012). Le bon niveau d'autorité correspondrait à un partage qui faciliterait la tâche de conduite tout en minimisant les interférences négatives lorsque le conducteur agit en contradiction avec l'action que le système estime être celle à exécuter. Diminuer le poids du système dans la réalisation de l'action limitera les risques d'interférence négative, mais au prix d'une influence moindre sur la direction du véhicule et de moins de guidage haptique fourni au conducteur. Au contraire, augmenter l'autorité du système pourrait le faire entrer en compétition avec le conducteur pour le contrôle du volant. Au global, le contrôle latéral du véhicule pourrait être amélioré, mais au prix d'un inconfort à la fois physique et psychologique généré par les phases d'opposition entre les deux agents. L'essentiel des études portant sur le contrôle partagé portent sur des systèmes dont le niveau d'autorité a été déterminé de façon empirique, sans qu'aucune méthode d'évaluation de la qualité de la coopération n'ait jamais été proposée.

Notre premier objectif a donc été d'analyser la coopération entre conducteur et automate au travers de l'analyse de plusieurs indicateurs objectifs (indicateurs de trajectoire et de contrôle volant, conduite avec occlusions visuelles autocontrôlées) et subjectif (cotations d'échelles de confort, de sécurité perçue, de sensations de contrôle et d'attention). Plusieurs réglages du système ont été testés, allant d'une action à peine perceptible du système (SC01) à une intervention ultra-autoritaire (SC100), en passant par des réglages modéré (SC11), intermédiaire (SC21) et relativement plus fort (SC31).

En outre, nous avons cherché à déterminer si l'optimum de répartition du partage dépendait des conditions de conduite, en particulier des conditions de visibilité qui déterminent la capacité des conducteurs à anticiper les changements de courbure de la route. En situation de visibilité dégradée, le conducteur pourrait chercher à s'appuyer davantage sur le guidage haptique. A contrario, le conducteur pourrait souhaiter conserver la pleine capacité à réagir à des événements inattendus et tout système ayant un niveau d'autorité haptique élevé pourrait donner lieu à des interférences négatives.

Les résultats de cette expérimentation furent riches d'enseignement. Je ne les détaillerai pas ici pour me concentrer sur les conclusions principales qui sont à la fois d'ordre méthodologique (comment évaluer la qualité de la coopération ?) et théorique (comment le conducteur intègre-t-il l'action du dispositif à la sienne ?).

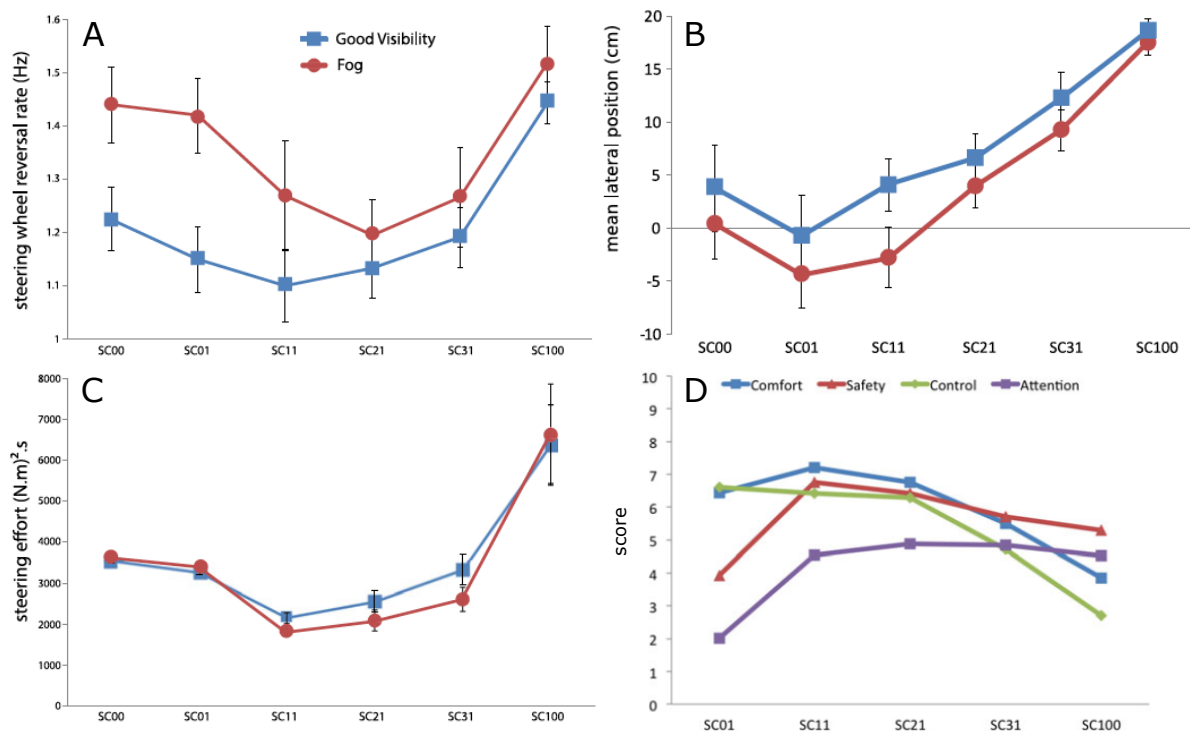


Figure 32 : Quelques-unes des variables rapportées dans Mars et al. (2014b) : A. fréquence des inversions volant, B. position latérale moyenne, C. efforts cumulés au volant en fonction de la répartition du partage entre conducteur et automate, en situation de bonne visibilité ou de brouillard épais. D. évaluations subjectives du confort à utiliser le dispositif, du gain de sécurité qu'il apporte, du sentiment de contrôle de la situation et de l'attention nécessaire à porter à la route en fonction de la répartition du partage.

L'approche choisie a consisté à croiser les indicateurs pour analyser finement la qualité de la coopération (Figure 32). De fait, les différentes variables analysées apportent des éléments

de compréhension à la fois cohérents et complémentaires. Les indicateurs subjectifs (Figure 32D), quoique nettement plus variables, s'accordent assez bien avec les indicateurs comportementaux. Cependant, parmi l'ensemble des variables, la fréquence des inversions volant s'est avérée particulièrement sensible aux manipulations expérimentales (Figure 32A). Cette variable pourrait donc être à privilégier dans une démarche de conception de système. Elle montre que l'essentiel des bénéfices en termes de stabilité du contrôle est obtenu avec un guidage haptique modéré (SC11). En situation de conduite nominale, augmenter d'un niveau l'autorité haptique du système n'apporte ni n'enlève rien au conducteur (SC21). L'amélioration de la performance de conduite s'observe de la même façon sur la plupart des autres indicateurs pour ces deux niveaux de partage. Le positionnement moyen dans la voie ne change pas par rapport à la condition contrôle, sans assistance.

Les premiers signes d'interférences négatives apparaissent lorsqu'on augmente la force du guidage (SC31), puis deviennent patents avec un réglage à l'évidence trop autoritaire (SC100). Seule la variabilité de l'écart latéral se maintient à un niveau constant, ce qui fait de cette variable un simple indicateur de la capacité du couple conducteur-automate à maintenir le véhicule dans sa voie indépendamment de la qualité de la coopération. Par contraste, la fréquence des inversions volant (Figure 32A) et la somme des efforts fournis au volant (Figure 32C) augmentent de façon significative. Quant au positionnement latéral moyen, il se décale vers l'intérieur des virages, alors même que le dispositif a plutôt tendance à corriger les écarts latéraux dans le sens opposé (Figure 32B). Il apparaît donc que le conducteur entre en compétition avec le système et finit par s'écarter de la norme qu'il fournit lorsque le degré d'intervention augmente trop.

Ces interférences négatives relèvent du conflit d'autorité, mais la notion d'autorité diffère ici de la façon dont elle est classiquement envisagée dans le domaine de la coopération homme-machine (Boy, 2012; Sheridan, 2011). En effet, la question du partage d'autorité se rencontre la plupart du temps en situation de délégation de fonction où l'opérateur devient le superviseur de l'automate. Dans ce contexte, le problème se résume souvent à savoir qui parmi les deux agents doit avoir le dernier mot en cas de conflit (voir par exemple la distinction entre *soft* et *hard automation* dans l'aéronautique civile ; Young, Stanton, & Harris, 2007). Si l'opérateur doit reprendre le contrôle, le problème consiste alors à gérer la phase de transition entre tâche déléguée et contrôle manuel. Avec le contrôle partagé du volant, aucune de ces deux questions ne se pose. Le conducteur reste toujours dans la boucle de contrôle opérationnel, l'intervention du système est aisée à surpasser et, de fait, l'autorité est entièrement (et littéralement) entre les mains du conducteur. En revanche, au travers du guidage haptique qu'il délivre, le système va avoir un caractère plus ou moins persuasif selon son réglage. Cela renvoie au concept d'autorité haptique tel qu'introduit par Abbink et al. (2012) auquel je propose de substituer le terme de persuasion haptique. Même si le système est conçu pour ne jamais s'opposer véritablement au conducteur, un guidage trop élevé peut mettre celui-ci en situation où il doit choisir entre suivre l'injonction du système ou aller contre.

Nos résultats pointent clairement le fait qu'un guidage haptique léger apporte l'essentiel des bénéfices qu'on peut attendre d'un tel système. Ils permettent donc de conclure que la recherche de la meilleure insertion d'un guidage haptique possible dans la boucle de contrôle de la direction doit s'apparenter à la recherche d'un « juste assez pour aider » plutôt que d'un « jusqu'où peut-on aller sans gêner ».

En situation de visibilité dégradée, les conducteurs tirent davantage bénéfice du contrôle partagé, comme on pouvait s'y attendre. La stabilité du contrôle volant, diminuée par la perte des capacités d'anticipation visuelle, est très nettement améliorée par le guidage fourni par l'automate (Figure 32A). Plus intéressant encore, il apparaît que l'optimum de répartition se décale vers plus d'intervention de la machine comparativement à la conduite nominale. Les résultats suggèrent donc que les conducteurs s'appuient davantage sur l'automate pour contrôler leur véhicule. Cela démontre clairement le potentiel de ce type de système pour l'assistance à la conduite, mais aussi l'intérêt qu'il pourrait y avoir à adapter la répartition du partage en fonction du contexte de conduite. La question de l'information à fournir au conducteur pour l'informer des variations de répartition se poserait alors.

L'autre manipulation expérimentale du contrôle visuel de la trajectoire a consisté à demander aux participants de conduire avec une vision de la route à la demande, en condition d'occlusions visuelles autocontrôlées. L'accès à la scène routière était contrôlé en actionnant par intermittence un des commodos. La conduite en contrôle partagé a permis de réduire d'environ 10 à 12% la fréquence des demandes de visibilité. En revanche, cette diminution n'était pas fonction du degré de répartition du partage. Le gain en termes d'attention visuelle que le conducteur estimait devoir porter à la route était lui aussi constant. Ces résultats montrent que, si le contrôle partagé facilite bien la conduite, le maintien effectif du conducteur dans la boucle de contrôle du véhicule limite largement son désengagement de la tâche.

4.4.3 L'adaptation au contrôle partagé

Par définition, le contrôle partagé maintient le conducteur dans la boucle de contrôle du véhicule. C'est pourquoi il est souvent mis en avant que ce type de système, tout en facilitant la conduite par la minimisation des efforts à fournir pour contrôler la trajectoire du véhicule, permettrait d'éviter les écueils de la délégation de fonction (complaisance, difficulté de reprise en main, etc.). Cependant, des études longitudinales manquent pour être affirmatif sur ce point. De fait, la littérature encore récente sur le contrôle partagé montre que la problématique est essentiellement abordée pour répondre à deux questions : comment fournir le meilleur guidage haptique et quels sont les bénéfices mesurables en termes de performance à la tâche de conduite (Abbink et al., 2012; De Winter & Dodou, 2011) ? Une question complètement inexploree est de savoir comment les conducteurs adaptent leur conduite lorsqu'ils interagissent de façon prolongée avec ce type de système. C'est précisément ce que nous avons cherché à déterminer en pointant trois types d'adaptations possibles au fil de l'usage : adaptation sensorimotrice, adaptation du contrôle cognitif et adaptation comportementale en termes d'homéostasie de la difficulté de la tâche (Mars, Deroo, & Charron, 2014).

Pour explorer ces questions, nous avons étudié l'évolution de la performance de conduite au fil de deux sessions expérimentales durant lesquelles les conducteurs ont parcouru à douze reprises un même circuit de 4,3 km. Les participants étaient répartis en deux groupes : une moitié conduisait sans assistance, l'autre moitié avec le contrôle partagé. Nous nous sommes intéressés à plusieurs marqueurs de l'adaptation pendant et après cette phase de conduite prolongée.

Au niveau sensorimoteur, le contrôle du mouvement, en particulier dans une situation de manipulation d'outils, nécessite de se construire et de mettre à jour un modèle interne des propriétés dynamiques de l'objet avec lequel on interagit (Imamizu et al., 2003; Nowak,

Glaser, & Hermsdörfer, 2013). Dans le cas du contrôle partagé, l'action de l'automate doit être intégrée dans les boucles sensorimotrices qui sous-tendent le contrôle du volant, ce qui implique la mise à jour du modèle interne des propriétés du volant. Selon Wolpert et Flanagan (2010), deux types d'apprentissage moteur peuvent intervenir lorsqu'on veut apprendre à manipuler un nouvel outil ou réaliser une nouvelle tâche. L'apprentissage peut être structurel. C'est le cas s'il y a besoin d'identifier les lois qui lient les entrées sensorielles et les commandes motrices, d'une part, et les mouvements de l'outil, d'autre part. Par exemple, l'ensemble des raquettes ont des propriétés structurelles communes en termes géométriques ou dynamiques, ce qui les distingue d'autres classes d'objets. A chaque nouveau type d'outils, une nouvelle structure doit être mise en place. A contrario, l'apprentissage paramétrique va consister en l'apprentissage du réglage des paramètres pour une structure prédéfinie. Par exemple, pour une raquette donnée, le joueur doit intégrer sa masse, la distribution des poids et la raideur de son cordage. L'apprentissage paramétrique est plus rapide, mais c'est bien l'apprentissage structurel qui va permettre de s'adapter à un plus grand nombre de situations. La découverte d'une nouvelle classe d'outils va donc typiquement consister en une période d'exploration pour identifier la structure adaptée, suivie d'une phase de paramétrisation pour régler la qualité du contrôle. Les travaux menés sur les changements de loi des retours d'effort au volant montrent que les conducteurs sont capables de s'y adapter rapidement, facilement et même inconsciemment, sauf dans des cas extrêmes (Toffin et al., 2007 ; voir section 3.2.2). L'adaptation à un changement de la dynamique du volant semble donc être de nature paramétrique. Il est probable que l'adaptation au contrôle partagé soit de même nature, même si un guidage haptique peut être moins prévisible qu'une simple modification de la loi de retour d'effort. C'est effectivement ce que nos résultats suggèrent, dans la mesure où la performance dans la tâche de contrôle latéral évolue de façon très similaire que la conduite s'effectue avec ou sans contrôle partagé. Le système diminue sensiblement la variabilité de la position latérale dès le premier essai, ce qui montre que l'action du système est intégrée aisément à l'action du conducteur au travers d'une mise à jour du modèle interne de la dynamique du volant. Ensuite, cette variabilité continue à diminuer au fil de l'expérience acquise dans les mêmes proportions pour les deux groupes de sujets, sans qu'il n'y ait d'indication d'un changement plus profond dans la façon de contrôler sa trajectoire (Figure 33).

Par ailleurs, il a été proposé que l'apprentissage moteur dépende de plusieurs processus d'adaptation ayant des constantes de temps différentes. Par exemple, l'adaptation à des champs de forces perturbant la réalisation d'un mouvement suggèrent l'existence d'au moins deux processus d'apprentissage opérant en parallèle (Smith, Ghazizadeh, & Shadmehr, 2006). Le premier processus, rapide, permet à l'opérateur de compenser des perturbations transitoires. Si ces perturbations persistent, un mécanisme d'adaptation sur la durée entre en jeu et consolide l'apprentissage moteur. Il a également été montré que la dynamique des changements de l'environnement (ou de l'outils avec lequel on interagit) détermine la robustesse de la mémoire motrice. Ainsi, l'expérience d'un environnement changeant rapidement va tendre à accélérer dans une phase ultérieure le désapprentissage du geste appris. A contrario, la mémoire d'une adaptation motrice acquise dans un environnement changeant de façon très graduelle va persister plus longtemps (Huang & Shadmehr, 2009). Afin de déterminer si ce type de consolidation s'opère sur le modèle interne de la dynamique du volant en situation de contrôle partagé, nous avons étudié les effets consécutifs à une désactivation inattendue du système. A la fin de l'expérience, les deux groupes de conducteurs réalisaient un dernier tour de circuit, mais cette fois en

conduisant tous en situation de contrôle partagé. Juste avant d'aborder le dernier virage du circuit, le système était désactivé sans que le conducteur ne soit averti. Au moment de la désactivation, les deux groupes étaient exactement dans la même situation et ne différaient que par l'expérience répétée du système acquise antérieurement ou pas. La Figure 33 montre que les sujets n'ayant pas utilisé le système de façon prolongée négocient le virage exactement comme à leur habitude, en coupant légèrement le virage (écart latéral moyen négatif et écart latéral maximum proche du centre de la voie), alors que les conducteurs habitués au contrôle partagé tendent à virer plus large qu'à l'accoutumé en se rapprochant du bord de voie extérieur. Cet effet démontre que l'apprentissage moteur s'effectue sur la base de plusieurs processus ayant des constantes de temps différentes. A un processus rapide qui permet une adaptation immédiate et efficace à l'action du système s'ajoute un processus plus lent qui consolide l'adaptation. Cette consolidation de l'apprentissage moteur est la condition d'apparition de l'effet consécutif à la désactivation du système. Cette consolidation est souhaitable en soi, mais si elle se traduit par des difficultés dans les phases de transition entre conduite avec et sans le système, que cette transition soit volontaire (désactivation du système) ou imprévue (défaillance), le risque associé en terme de sécurité n'est peut-être pas négligeable.

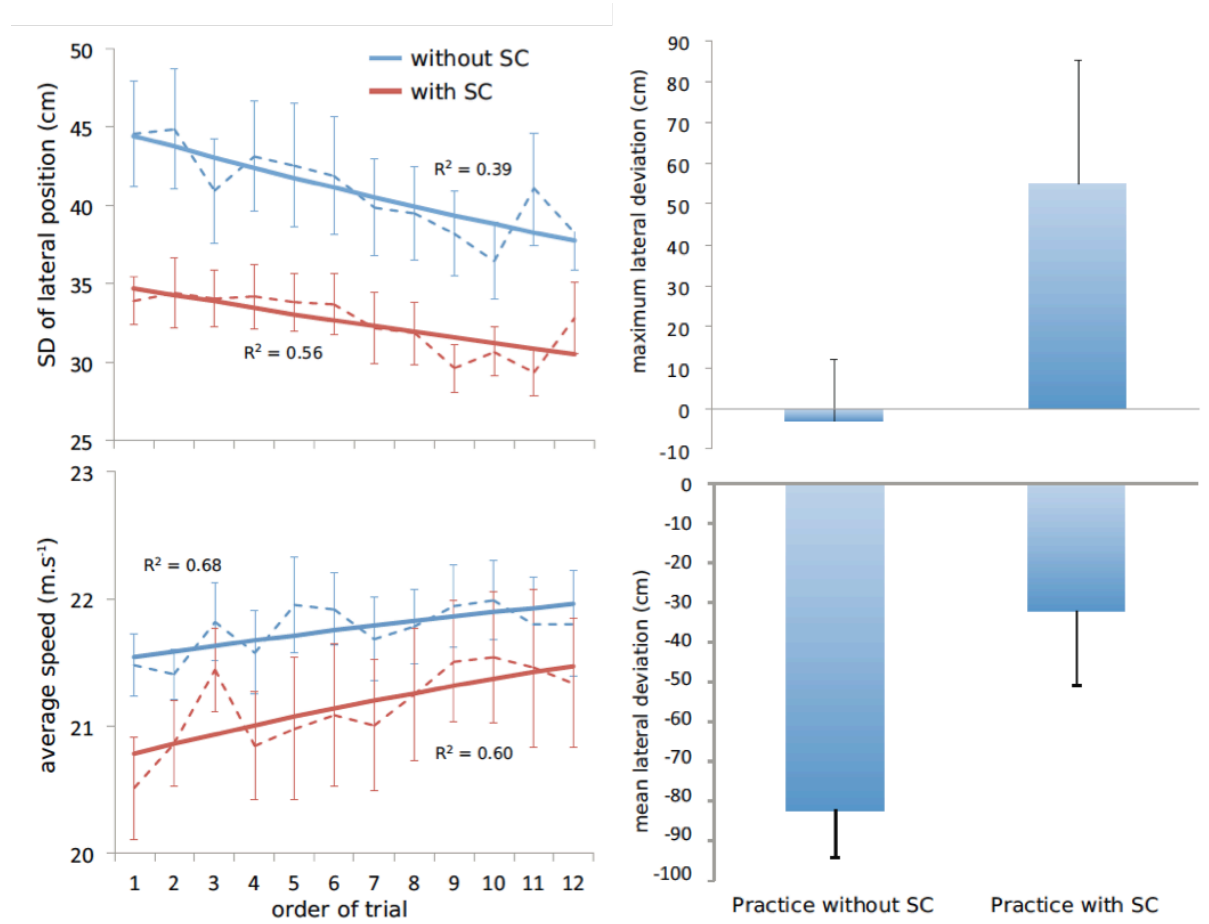


Figure 33 : A gauche, évolution de la performance de conduite (variabilité de la position latérale et vitesse longitudinale) en fonction de l'expérience de conduite avec ou sans contrôle partagé. A droite, les indicateurs de positionnement latéral après désactivation inattendue du système pour les deux groupes de sujets. Extrait de Mars et al. (2014a).

L'adaptation au contrôle partagé peut également être évaluée en termes de contrôle cognitif. Typiquement, dans les modèles hiérarchiques tel que le modèle SRK de Rasmussen

(1983), ou d'autres (voir section 2.1.2), le développement de l'expertise repose au moins en partie sur une transition progressive d'un contrôle de l'activité par des processus cognitifs de haut niveau (dirigés par les connaissances et par les règles dans le cas du modèle SRK) vers un contrôle dirigés par des routines automatisées (des habiletés). En d'autres mots, lors des phases initiales d'apprentissage de l'interaction avec un nouveau système, un opérateur va mettre en œuvre des processus de supervision de son activité, puis, progressivement, va se reposer sur processus de contrôle implicites, voire sur des habiletés purement sensorimotrices dans les tâches qui le permettent, ce qui va libérer incidemment des ressources cognitives pour traiter des tâches annexes.

Nous avons cherché à déterminer dans quelle mesure cette transition s'opérait lors de l'apprentissage de la conduite en contrôle partagé. L'indicateur choisi pour évaluer la routinisation de l'activité était l'évolution de la proportion de temps passée à penser à autre chose que la conduite (*mind wandering*, que je traduirais ici par vagabondage cognitif). L'hypothèse était que cette proportion augmenterait au fil de la répétition des essais de la même façon avec ou sans contrôle partagé uniquement si celui-ci s'insérait efficacement dans les boucles sensorimotrices. A contrario, le conducteur pourrait choisir de superviser plus longtemps le fonctionnement de l'automate, voire maintenir un niveau de surveillance constant de son action. Les résultats obtenus soutiennent très clairement la première proposition (Figure 34). Le vagabondage cognitif a augmenté très régulièrement au fil de la répétition des essais de façon presque identique avec ou sans contrôle partagé. Il semblerait donc que l'interaction avec le système, qui s'effectue au niveau sensorimoteur, n'ait pas induit d'émergences cognitives susceptibles d'inciter le conducteur à superviser l'action de l'automate.

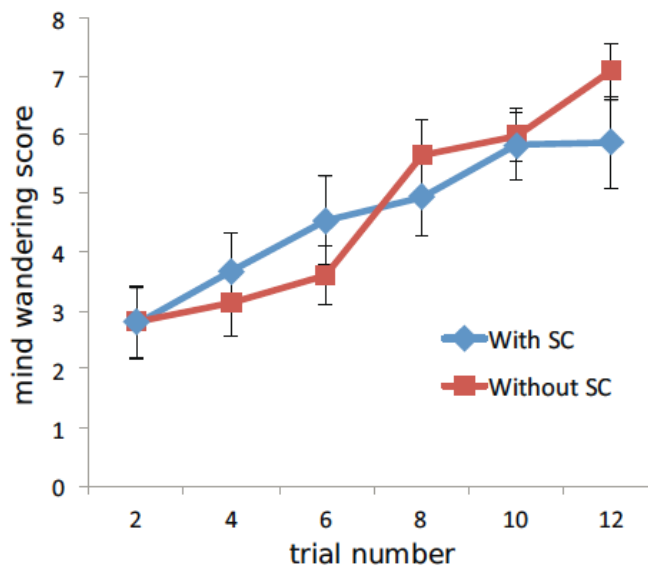


Figure 34 : Evolution du vagabondage cognitif, marqueur d'une diminution du contrôle supervisé de la conduite, avec ou sans contrôle partagé. Extrait de Mars et al. (2014a).

Enfin, la question se pose de savoir si le contrôle partagé ne risque pas d'induire des adaptations comportementales telles qu'on peut les rencontrer lors de l'introduction d'une assistance à la conduite. Typiquement, un dispositif va influencer la réalisation d'une fonction directement en rapport avec celle qu'il assiste (ex : la réduction du temps intervéhiculaire avec l'ABS rapportée par Sagberg et al., 1997). L'adaptation comportementale peut aussi être plus indirecte (ex : modification du positionnement latéral avec l'ACC qui agit

sur le contrôle longitudinal ; voir Hoedemaeker & Brookhuis, 1998). Ces exemples qui concernent des dispositifs de sécurité sont typiquement expliqués en faisant appel à des modèles de compensation du risque. Dans le cas du contrôle partagé, on peut se demander dans quelle mesure la facilitation du contrôle latéral peut induire une élévation de la vitesse par un phénomène d'homéostasie de la difficulté de la tâche (Fuller, 2005). Pour répondre à cette question, nous avons analysé l'évolution de la vitesse moyenne au fil de l'expérience de conduite. La Figure 33 montre que le groupe conduisant avec le contrôle partagé a adopté une vitesse moyenne légèrement inférieure à l'autre groupe, mais cette différence n'est pas significative. Pour les deux groupes, la vitesse a augmenté modérément mais significativement avec la répétition de la tâche, dans les mêmes proportions. Ceci suggère que la facilitation du contrôle latéral ne s'accompagne d'aucune forme de compensation pouvant s'apparenter à une adaptation comportementale. Cependant, ce type d'adaptation pourrait nécessiter plus de temps pour se mettre en place. Une étude longitudinale de plus grande ampleur serait nécessaire pour conclure avec plus d'assurance sur ce point.

4.4.4 Vers un partage piloté par un modèle du conducteur

Si l'on veut réaliser un contrôle partagé harmonieux, il est primordial que le conducteur et l'automate s'entendent sur la meilleure action à exercer sur le volant ou, en cas de désaccord, que l'automate s'efface pour laisser la pleine maîtrise du volant au conducteur. Les deux agents doivent donc avoir un référentiel commun, qui peut prendre la forme d'une trajectoire de référence. Cette problématique est centrale, en particulier sur route sinueuse. Une première approche consiste à concevoir l'automate sur la base d'un modèle véhicule-route, ce qui revient le plus souvent à prendre comme référence le centre de la voie de circulation évaluée à une distance donnée en amont du véhicule et à régler le contrôleur de l'automate de sorte à ce qu'il laisse au conducteur la liberté de s'en écarter. Cette approche est celle adoptée sur les aides actives au maintien dans la voie déjà sur le marché et essentiellement adaptée à la conduite autoroutière. Une autre approche, plus originale, est celle que nous avons développée dans le cadre du projet ANR PARTAGE. Il s'agissait de concevoir la loi de commande du système sur la base d'un modèle conducteur-véhicule-route. L'introduction d'un modèle du conducteur dans la synthèse de la loi de commande permet de faire des prédictions sur les trajectoires spontanément adoptées par le conducteur et de les prendre en compte pour la réalisation de l'action. Cela permet également d'introduire des critères de coopération intrinsèques à la loi de commande. Enfin, en mettant en œuvre une procédure d'identification paramétrique individualisée, la loi de commande pourrait être adaptée à chaque conducteur. Ma contribution à ce travail a porté sur la spécification fonctionnelle du système d'assistance, la définition du modèle du conducteur et la définition de nouveaux critères d'évaluation de la coopération homme-machine spécifiquement adaptés au paradigme du contrôle partagé. L'ensemble de cette démarche de conception est présentée dans Saleh et al. (2012, 2013). Je ne reviendrai pas ici sur le modèle du conducteur déjà décrit auparavant (section 3.3), mais je vais exposer brièvement la logique de conception et la définition des critères d'évaluation.

Les travaux ont consisté à concevoir deux lois de commandes pour le contrôle partagé, à des fins de comparaison (Figure 35). Dans le premier cas, l'automate, appelé Colat1, consiste en un régulateur de suivi de voie conçu sur la base d'un modèle du système véhicule-route, sans hypothèse explicite sur l'action du conducteur. Colat1 est conçu comme un « pilote électronique » destiné à conduire seul le véhicule. La loi de commande est basée sur un

algorithme d'optimisation qui minimise une somme pondérée de l'écart latéral du véhicule, de son erreur de cap, de l'accélération latérale et du couple au volant pour pouvoir maintenir le véhicule dans sa voie. Le partage avec le conducteur est le fait d'une application partielle de la commande produite, au travers du coefficient d'intervention α , la partie complémentaire du couple à appliquer sur le volant restant à la charge du conducteur. Par ailleurs, le couple délivré sur le volant étant limité à 5 N.m, avec une variation maximale de 3 N.m/s, de sorte à éviter au conducteur de devoir développer des efforts importants en cas de désaccord avec l'action du système. Cette stratégie de commande s'est avérée efficace, comme le montrent les travaux décrits plus haut (Mars et al., 2014a, 2014b). Cependant, nous avons fait l'hypothèse qu'une stratégie plus avancée, basée sur un modèle du système conducteur-véhicule-route, au travers de l'exploitation d'un modèle du conducteur réaliste du point de vue du contrôle sensorimoteur chez l'homme, permettrait un partage plus harmonieux. Le contrôleur ainsi synthétisé, désigné CoLat2, s'appuie sur les prédictions du modèle conducteur embarqué, ce qui permet d'introduire deux nouveaux critères d'optimisation qui s'ajoutent à ceux de CoLat1. Premièrement, le niveau de partage entre conducteur et automate est spécifié dans la loi de commande et non pas appliqué en sortie, ce qui de fait permet d'obtenir un taux de partage effectif proche du taux théorique, alors que, pour CoLat1, le niveau d'intervention est nécessairement réglé de façon empirique. Deuxièmement, et plus essentiel encore, la loi de commande pénalise les actions antagonistes entre assistance et conducteur, limitant ainsi les phases d'opposition entre les deux agents.

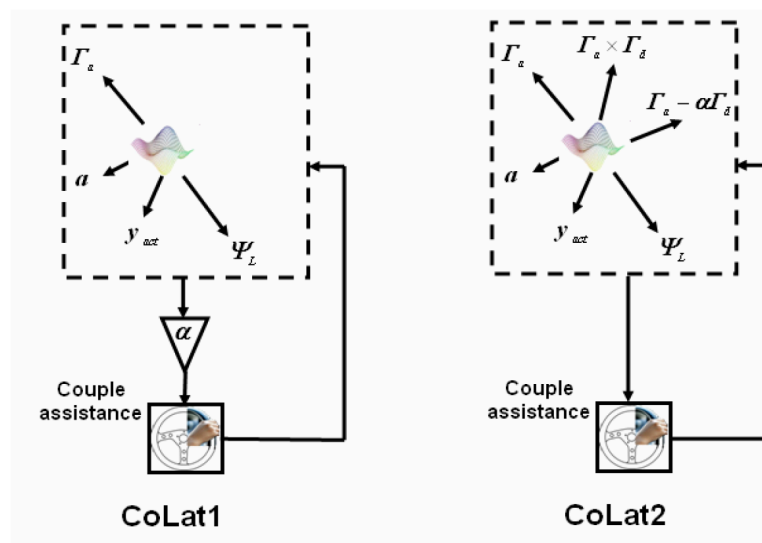


Figure 35 : Comparaison entre les deux stratégies de commande pour le contrôle partagé développées par Saleh et al. (2012, 2013). L'intégration du modèle conducteur dans CoLat2 permet d'inclure des critères de coopération dans la loi de commande.

Les travaux expérimentaux pour valider la pertinence de notre approche restent à réaliser et forme une perspective à ce travail. Seuls quelques essais ont été réalisés comparant CoLat1 et CoLat2 pour un conducteur et un coefficient d'intervention fixé à $\alpha=0,5$. Cette comparaison est sujette à caution, non seulement parce qu'elle est effectuée sur un seul individu, mais aussi car le coefficient choisi est bien trop élevé pour donner lieu à une coopération satisfaisante avec CoLat1 (pour rappel, les premiers signes d'interférence négatives entre conducteur et automate apparaissait pour un $\alpha=0,31$ dans les résultats

rapportés par Mars et al., 2014b). Je vais cependant la rapporter ici comme illustration de l'application de la seconde contribution de ces travaux : la définition de nouveaux critères d'évaluation pour le contrôle partagé. De fait, le principe du contrôle partagé étant relativement nouveau, les critères d'évaluation manquent. Nous avons cherché à remédier à cette carence en complétant les indicateurs habituels du contrôle de la trajectoire par plusieurs indicateurs de la qualité du partage.

Tout d'abord, le niveau de partage peut être calculé comme le rapport entre la somme des efforts au volant fournis par l'assistance et la somme des efforts fournis par le conducteur. L'essai comparatif a montré que ce taux était de 1,5 pour CoLat1 et 1,08 pour CoLat2. Il semble donc que CoLat2 s'éloigne peu du rapport théorique de 1, conformément au fait qu'il s'agit de l'un des critères optimisés par la loi de commande, alors que CoLat1 s'en écarte très nettement. Un autre indicateur global est proposé pour caractériser la cohérence des actions entre les deux agents. Il est basé sur le produit scalaire entre le couple d'assistance et le couple du conducteur. Le cosinus de l'angle entre les deux couples mesurés sur l'ensemble de la conduite fournit le niveau de contradiction. La Figure 36 montre que, avec CoLat1, le couple du conducteur Γ_d est réduit par rapport à la condition sans assistance ($2600 \text{ (N.m)}^2.s < 3000 \text{ (N.m)}^2.s$), mais le couple d'assistance Γ_a est élevé et majoritairement orienté dans la direction opposée à celui du conducteur ($\cos(124^\circ)=-0,56$). Pour CoLat2, le couple conducteur est deux fois moins important qu'avec CoLat1 et l'action du système est plus cohérente ($\cos(84^\circ)=0,18$).

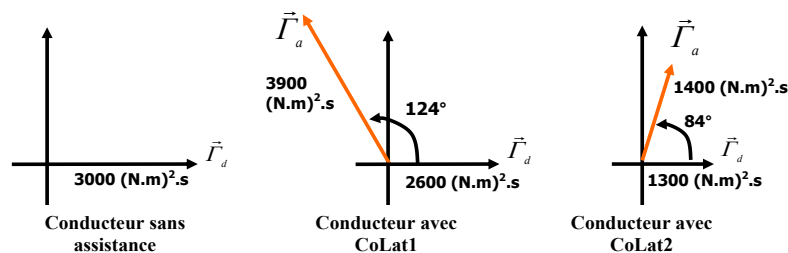


Figure 36 : La cohérence entre l'action du conducteur et de l'automate évaluée par le cosinus de l'angle entre les deux couples mesurés.

Pour affiner ce résultat, trois indicateurs supplémentaires peuvent être calculés :

- le taux de cohérence, T_{coh} : proportion du temps pendant lequel l'action de l'assistance s'exerce dans le même sens que l'action du conducteur. Ici, $T_{coh}= 0,28$ pour CoLat1 ; $T_{coh}= 0,55$ pour CoLat2 ;
- le taux de résistance, T_{res} : proportion du temps pendant lequel l'action de l'assistance s'exerce dans le sens opposé à l'action du conducteur, mais par un couple plus faible. Ici, $T_{res}= 0,30$ pour CoLat1 ; $T_{res}= 0,27$ pour CoLat2 ;
- le taux de contradiction, T_{cont} : proportion du temps pendant lequel l'action de l'assistance s'exerce dans le sens opposé à l'action du conducteur, avec un couple plus élevé. Ici, $T_{cont}= 0,42$ pour CoLat1 ; $T_{cont}= 0,18$ pour CoLat2 ;

Ces résultats n'ont que valeur d'illustration. Des expérimentations doivent maintenant être menées pour déterminer, pour des niveaux d'effort comparables et dans des conditions de conduite variées, si l'inclusion du modèle conducteur dans la loi de commande améliore véritablement la qualité de la coopération homme-machine. Une autre question importante est d'évaluer dans quelle mesure l'individualisation des paramètres du modèle conducteur

peut permettre d'ajuster au mieux le comportement de l'assistance aux spécificités de chaque conducteur.

4.5 Délégation du contrôle latéral, prise d'information et reprise en main

Je vais maintenant évoquer brièvement un dernier ensemble de travaux portant sur la coopération homme-machine en conduite automobile. Il concerne la délégation complète du contrôle latéral à un automate. Le rôle du conducteur consiste alors à réguler sa vitesse et à superviser le bon fonctionnement de l'assistance. Ce type d'automatisation partielle n'a pas véritablement vocation à être intégré dans les véhicules de demain, car il paraît peu judicieux de découpler l'automatisation du contrôle de la trajectoire de l'automatisation de la vitesse. En revanche, il peut être considéré comme un paradigme pour étudier la problématique des véhicules autonomes, tout en distinguant l'influence de l'automatisation de chacune des sous-tâches. D'ailleurs, Carsten, Lai, Barnard, Jamson et Merat (2012) montrent que la délégation du contrôle latéral seul se rapproche beaucoup plus de l'automatisation complète du véhicule que la délégation du contrôle longitudinal, notamment en ce qui concerne l'attention portée à la route.

Contrairement à l'ensemble des travaux rapportés jusqu'ici, le conducteur n'intervient plus dans la boucle du contrôle de la trajectoire. Nous avons donc abordé la délégation du contrôle latéral pour tenter de répondre à deux questions potentiellement liées :

1. Comment caractériser d'éventuelles difficultés de reprise en main en situation d'invalidité du dispositif ?
2. Quelles conséquences la délégation du contrôle a-t-elle sur les prises d'information visuelle ?

Lors d'une première expérimentation sur piste, nous avons utilisé un évitement d'obstacle pour étudier la reprise en main du contrôle latéral du véhicule (Hoc et al., 2006). Des indices de difficultés de reprise en main ont été observés, en particulier un contournement plus tardif et plus brutal de l'obstacle. La méthode utilisée pour étudier les prises d'information visuelle, fondée sur la détection évaluée a posteriori d'un ensemble de logos placés à différents endroits du circuit, n'a pas donné de résultats réellement concluants. Tout au plus avons-nous observé une tendance des conducteurs à moins prendre d'information aux proximités des bords de voie. L'étude a donc été répliquée sur simulateur de façon plus contrôlée et en mettant en œuvre des techniques d'analyses oculométriques (Navarro, François, & Mars, soumis). Les participants réalisaient sept tours d'un circuit d'environ 3.4 km sans assistance et sept tours avec assistance, dans un ordre ou dans l'autre. Les conducteurs avaient à éviter un véhicule à l'arrêt sur la voie de circulation à deux reprises dans chaque condition. Même si les conducteurs étaient informés de la présence d'obstacles sur la route, un faisceau de variables montre que les conducteurs sont moins efficaces dans leur manœuvre de contournement lorsque l'assistance est en fonctionnement (Figure 37). Ils entreprennent la manœuvre plus tardivement (temps avant contact réduit de 260 ms) que sans assistance. L'amplitude du mouvement de volant nécessaire à cette manœuvre est augmentée de 33%, résultant en un écart latéral plus important de 40%.

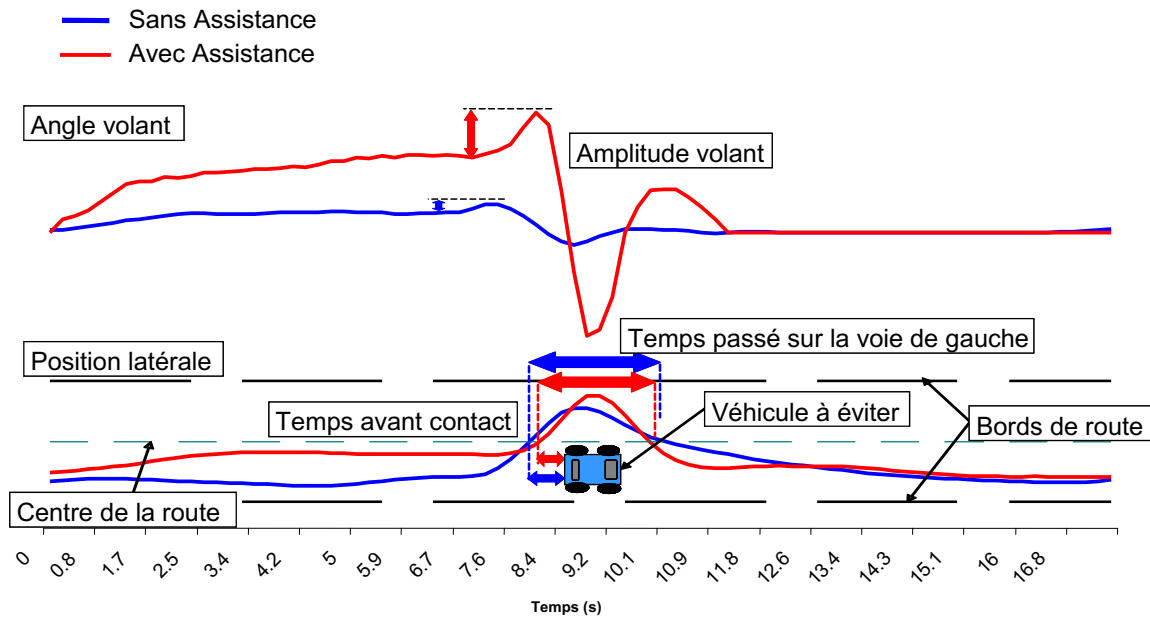


Figure 37 : Représentation schématique d'un évitement d'obstacle avec et sans délégation du contrôle latéral.

Ces difficultés de reprise en main s'expliquent très probablement, au moins en partie, par l'ajout d'une tâche tactique (décision de reprise en main) à la tâche opérationnelle d'exécution de la manœuvre de contournement. Il s'agit peut-être aussi d'une expression du syndrome de l'opérateur hors de la boucle, mais plutôt qu'un phénomène de complaisance tel que classiquement rapporté dans la littérature sur l'automatisation des tâches, le problème pourrait résider dans la nécessité de réactiver la boucle sensorimotrice qui soutient le contrôle de la trajectoire. En effet, la complaisance s'installe classiquement lorsqu'une tâche prise en charge par un automate cohabite avec une ou plusieurs tâches encore sous le contrôle de l'opérateur. L'opérateur peut alors se satisfaire de l'action réalisée par la machine et cesser de superviser son action, libérant des ressources pour traiter les tâches dont il a lui-même la charge (Parasuraman & Manzey, 2010). Or, dans le cas présent, la supervision tactique du déplacement du véhicule, tout comme la surveillance de la présence d'obstacle, est de fait effectuée par le conducteur au travers de l'analyse de la scène visuelle, qu'il agisse ou non sur le volant. La difficulté de reprise en main ne se situerait donc pas à un niveau tactique, mais concernerait plutôt la mise en défaut du contrôle de la trajectoire à un niveau sensorimoteur. L'analyse réalisée sur les données oculométriques des participants va dans ce sens, puisque la distribution du regard évolue avec la délégation du contrôle latéral vers moins de prises d'information à moyen terme dans la région du point tangent et plus de fixations très anticipatives. Ce glissement a déjà été rapporté en conduite nominale (Mars & Navarro, 2012 ; cf. section 3.1.2). L'effet était alors d'une amplitude relativement modérée, puisque seules 5% des prises d'information changeaient d'une condition à l'autre. En situation d'invalidité de l'automate, lorsqu'un contournement doit être réalisé, l'effet est bien plus massif, avec un déplacement de regard plus en amont dans le virage (13%) et plus haut vers l'horizon (30%) en situation de conduite déléguée (Figure 38). Tout se passe donc comme si le conducteur, parce qu'il n'était pas impliqué dans la boucle du contrôle de la trajectoire au moment de l'initiation du comportement, ne réussissait pas à mettre en œuvre les stratégies de prises d'information pourtant les plus utiles à la réalisation de la tâche de contournement en virage.

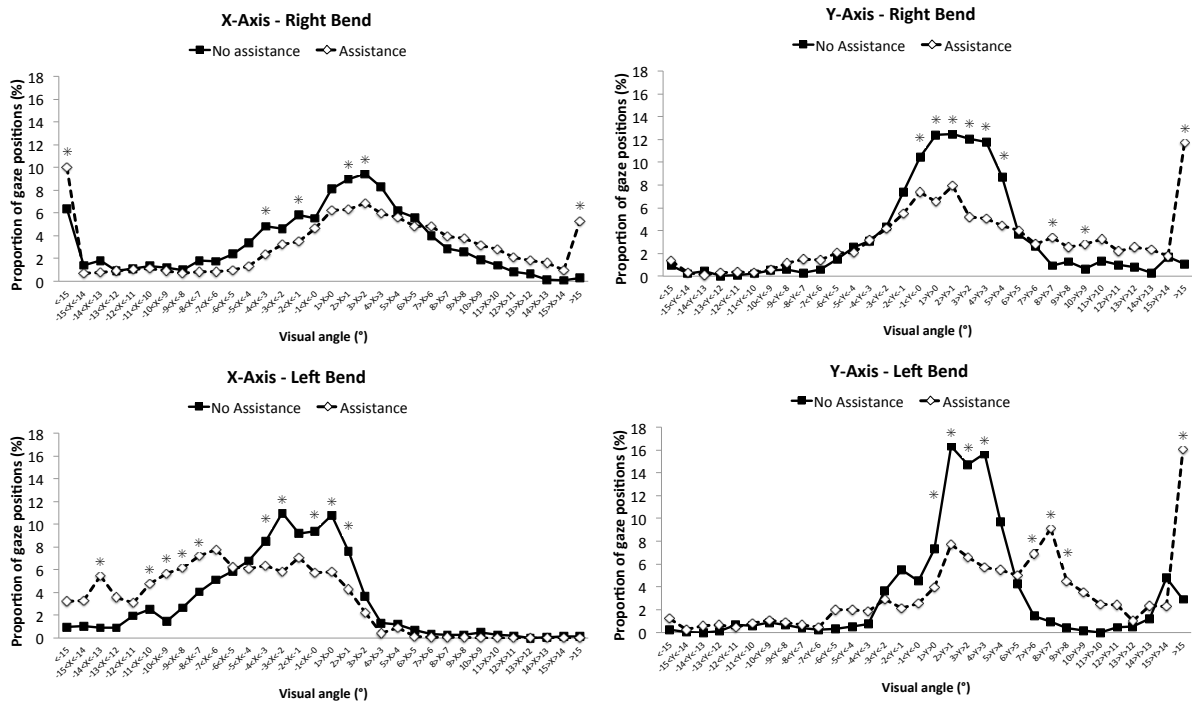


Figure 38 : Distribution horizontale (gauche) et verticale (droite) du regard en situation de contrôle latéral manuel ou délégué dans un virage à droite (haut) et un virage à gauche (bas). Tiré de Navarro et al. (soumis).

Considérées ensemble, les deux expérimentations en conduite nominale et en situation critique suggèrent que la délégation du contrôle latéral, et a fortiori la conduite autonome, s'accompagne d'une modification des prises d'information qui entrent en jeu normalement dans le contrôle visuomoteur. Cette modification se fait au profit d'une plus grande anticipation à long terme, ce qui n'est pas en soi une conséquence néfaste. Il serait par exemple intéressant d'évaluer dans quelle mesure la détection précoce de danger pourrait en être améliorée. Cependant, nos résultats montrent que lorsque le danger ne peut pas être anticipé et que la reprise du contrôle doit se faire en urgence, le contrôle visuomoteur de la trajectoire ne peut être réactivé efficacement. L'augmentation des prises d'information à long terme, qui alimente le contrôle tactique de l'activité, se ferait donc au détriment du contrôle du déplacement au niveau sensorimoteur.

5. Synthèse et perspectives

La dernière section du document va faire le lien entre la contribution théorique initiale pour sur l'organisation hiérarchique du contrôle de l'activité en conduite automobile et l'ensemble de mes travaux empiriques portant sur le contrôle de trajectoire. Pour cela, je vais chercher à spécifier le modèle SIES présenté en section 2.6, modèle qui se veut générique, en le déclinant pour la problématique spécifique du contrôle de trajectoire. En cohérence avec les travaux réalisés, l'accent sera porté sur le contrôle sensorimoteur et les relations qu'il entretient avec les niveaux de contrôle tactique implicite et explicite. Je chercherai dans un second temps à préciser comment se projettent sur ce modèle les différentes modalités d'assistance à la conduite étudiées.

5.1 L'organisation hiérarchique du contrôle de la trajectoire

La Figure 39 forme une tentative de représentation de l'ensemble des processus élémentaires impliqués dans le contrôle du déplacement en reprenant l'architecture de contrôle à quatre niveaux du modèle SIES. Cette figure ne doit pas être vue comme un modèle à proprement parler, mais plutôt comme une représentation graphique facilitant l'intégration des conclusions issues de mes travaux dans le cadre conceptuel fourni par le modèle SIES. Chaque module est numéroté pour simplifier les renvois à la figure qui seront faits dans la suite du texte entre crochets.

En haut de la hiérarchie, on retrouve le contrôle stratégique en charge de la spécification des buts du trajet [1] et de la planification de l'itinéraire [3]. Celle-ci fournit les objectifs intermédiaires à atteindre au niveau inférieur qui, en retour, lorsque l'analyse du contexte routier rend le plan initial caduque, peut déclencher une activité de résolution de problème [2] pour générer un nouvel itinéraire. Ce niveau de contrôle n'influence qu'indirectement le contrôle de trajectoire au travers du choix du type de route empruntée : choisir d'emprunter une route secondaire plutôt qu'une autoroute, par exemple revient à faire le choix d'un parcours plus sinueux qui sollicitera d'avantage les niveaux de contrôle inférieurs.

Le contrôle tactique explicite est le niveau de la supervision de la situation de conduite. Il traite en entrée un certain nombre d'informations reconnues dans le contexte, tel que le trafic [4] et la signalisation routière [5], mais on pourrait y ajouter la supervision de l'état du véhicule (au travers des informations du tableau de bord notamment), la détection d'obstacle ou tout autre aléa devant être pris en compte pour adapter la conduite du véhicule. C'est donc là que s'opère le diagnostic de la situation [6] à partir duquel des procédures factuelles sont activées en mémoire à long terme [7]. Il s'agit du domaine des règles prescrites (code de la route, par exemple) ou élaborées par l'individu au fil de l'expérience de conduite. Le contrôle de trajectoire dépend des choix tactiques comme ceux concernant l'opportunité d'initier un dépassement, la décision de faire un écart pour éviter un danger potentiel ou la réduction anticipée de la vitesse en approche de virage telle que suggérée par la signalisation.

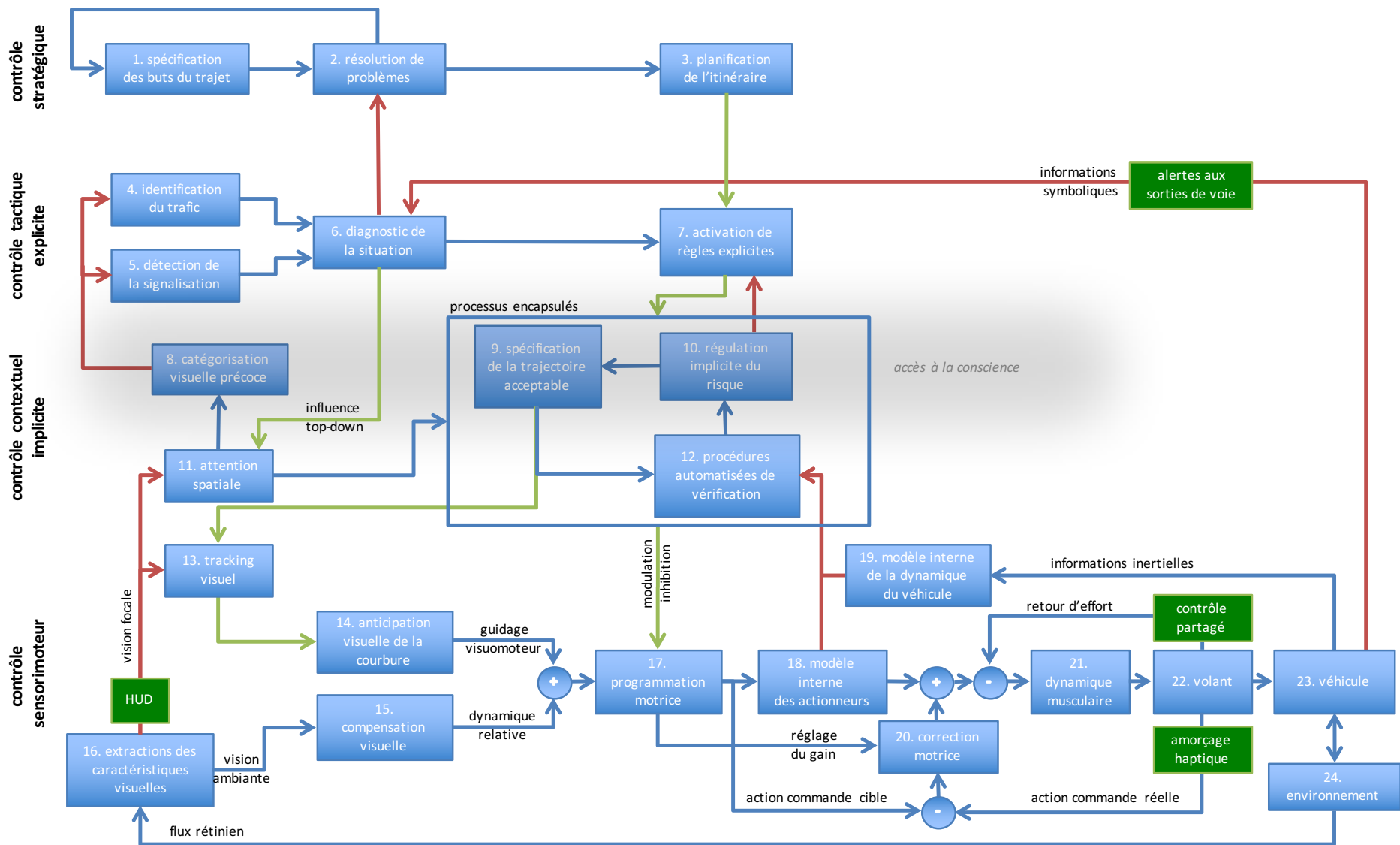


Figure 39 : Déclinaison du modèle SIES pour la problématique du contrôle de trajectoire

Au niveau du contrôle tactique implicite sont représentés un ensemble de routines fortement automatisées, pour l'essentiel inconscientes et difficilement verbalisables, en charge de l'exploration de la scène visuelle, de la détection des anomalies potentielles et de la mise en œuvre de procédures expertes encapsulées. Sur le versant perceptif, c'est le domaine de la distribution de l'attention spatiale [11], et donc des patterns d'exploration de la scène visuelle par le regard. Ces processus déterminent la distribution du regard entre les différentes sources d'information à traiter, en particulier entre le monitoring de la route et l'identification des éléments de l'environnement. Ils sont déterminés à la fois par le diagnostic de la situation [6] pour les influences descendantes (processus top-down) et par les caractéristiques de la scène visuelle [16] pour les influences ascendantes (processus bottom-up ; voir Talsma, Senkowski, Soto-Faraco, & Woldorff, 2010, pour une synthèse intéressante sur les modulations ascendantes et descendantes de la distribution de l'attention spatiale). Les processus bottom-up reposent sur les fixations oculaires qui orientent la vision centrale à des fins d'identification des objets de l'environnement. On peut faire l'hypothèse que les catégorisations visuelles précoces [8] permettent la prise en compte d'un risque potentiel avant même leur intégration dans un diagnostic conscient de la situation, même si les arguments expérimentaux manquent pour soutenir ce point.

Au-delà de l'identification des objets de l'environnement, la vision focale peut servir à évaluer certaines caractéristiques du contexte actuel immédiat, comme la géométrie de la route évaluée de façon anticipée (haut de côte sans visibilité ou virage perçu comme serré, par exemple) sans faire appel à un diagnostic explicite. Ces prises d'information alimentent des processus encapsulés de vérification du bon déroulement de la tâche [12]. Ces processus traitent également les anomalies détectées au niveau sensorimoteur au travers des canaux haptique (volant) et vestibulo-somesthésique (informations inertielles). On peut faire l'hypothèse que ces processus de vérification, en charge de détecter des configurations perceptives inhabituelles, soient assimilables à des modèles internes multisensoriels d'intégration élevée, tels que proposés par Pezzulo et Castelfranchi (2009) ou Wolpert et al. (2003), par opposition aux modèles internes des actionneurs [18] ou de la dynamique du véhicule [19] du niveau sensorimoteur. Lorsque qu'une incohérence ou une différence entre ce qui est attendu et ce qui est ressenti est détectée (ou anticipée), un mécanisme de régulation du risque pourrait entrer en jeu soit de manière implicite [10], soit par l'activation d'une règle explicite [7].

Même si la distinction entre gestion explicite et implicite des risques n'est pas toujours aisée à appréhender, elle se justifie selon moi dans la mesure où cela correspond à deux modalités de contrôle différentes. Lorsqu'un seuil critique est dépassé, une émergence cognitive apparaît et appelle la mise en œuvre d'une règle explicite. Par exemple, si je détecte en amont une plaque de verglas ou si je ressens un flottement de la direction, je sais que les conditions d'adhérence se détériorent et je vais appliquer une règle apprise : je réduis ma vitesse sans mobiliser le frein pour éviter le dérapage. Par opposition, la régulation implicite du risque correspond à des mécanismes de régulation qui interviennent en continu et qui définissent les marges de sécurité que se donne le conducteur. Cela renvoie notamment aux travaux de Raymond et al. (2001) qui montrent que le risque de sortir du domaine de stabilité du véhicule est géré en maintenant les accélérations latérales anticipées dans une enveloppe de sécurité dans les paramètres varient fortement entre individus (cf. section 3.2.3). La régulation implicite du

risque détermine directement l'enveloppe de trajectoire acceptable [9], une notion qui fait écho au concept de *field of safe travel* tel que développé par Gibson et Crooks (1938). Elle peut être conçue comme une enveloppe de trajectoires possibles qui se projette à l'avant du véhicule, ses limites étant déterminées par les caractéristiques de la route ou les obstacles potentiels auxquels sont associés des valences selon le risque qu'ils représentent (Figure 40). Sa mise à jour s'effectue de façon implicite en s'appuyant en grande partie sur les remontées d'information du contrôle sensorimoteur, mais elle peut être modulée en fonction du contexte par le contrôle tactique explicite, si, par exemple, le conducteur a moins confiance en son véhicule aujourd'hui qu'hier. Lorsque l'enveloppe est compromise, une émergence cognitive peut apparaître et mener à un changement de comportement, comme réduire la vitesse. La pondération de ces remontées d'informations et la psychophysique des émergences cognitives restent cependant encore largement à préciser. Les travaux menés dans le cadre de la thèse de Thomas Denoual (section 3.2.4) constitue une des rares tentatives dans le domaine.

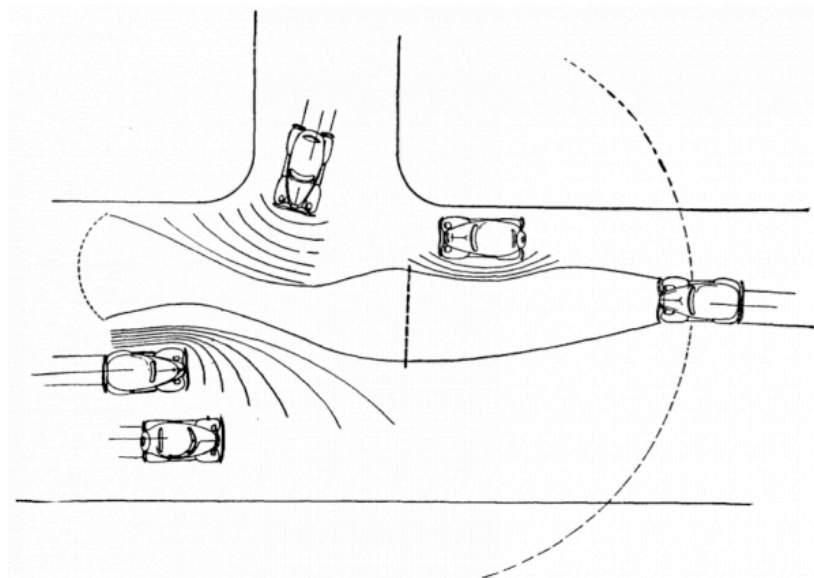


Figure 40 : Le *field of safe travel* selon Gibson et Crooks (1938)

La représentation des processus sensorimoteurs s'inspire en grande partie des travaux de modélisation rapportés dans la section 3 du document. On y retrouve le principe du contrôle visuel à deux niveaux. Sur la base des informations extraites du flux rétinien [16], le contrôle visuel de la trajectoire repose sur un processus de compensation des erreurs de positionnement latéral [15] et sur l'anticipation des changements de courbure de la route en amont [14]. Au niveau sensorimoteur stricto sensu, l'anticipation visuelle est donc conçue comme une boucle visuomotrice alimentée par la dynamique du regard (et non pas par l'analyse du contenu des fixations). Il s'agit donc d'une anticipation à court terme des changements de courbure de la route par la poursuite de points de référence en amont du véhicule qui alimente directement le système moteur en charge du contrôle du volant. Comme pour toute tâche de tracking, on peut faire l'hypothèse d'une influence réciproque de la commande des muscles du bras (copie d'efférence et réafférences proprioceptives) sur la commande oculaire (Lazzari et al., 1997; Vercher et al., 1997). C'est ce que suggère les résultats de Mars et Navarro (2012) au travers de la comparaison entre conduite active et conduite passive, même si des travaux

complémentaires sont nécessaires pour valider cette hypothèse. Plus importante est la question des indices visuels privilégiés pour la détermination du positionnement du regard. Nos travaux confirment qu'une proportion importante des prises d'information s'effectuent dans la région du point tangent et qu'une coordination visuomanuelle accrue dans cette région améliore la stabilité du contrôle (Mars, 2008a, 2008b). Cependant, plutôt que le point tangent spécifiquement ou la trajectoire future, nous avons proposé que le contrôle du regard vise à explorer les limites de l'enveloppe de trajectoires acceptables (Mars & Navarro, 2012). Ceci est représenté dans la Figure 39 par l'influence descendante de la spécification de la trajectoire acceptable [9] sur le processus de tracking visuel [13]. Dans cette conception, le point tangent est considéré comme un point saillant qui peut être utilisé comme ancrage pour la stabilisation du regard au même titre que d'autres indices dont la dynamique est fonction de celle de la route en amont. Quant aux fixations de type *look-ahead*, elles participent à l'anticipation mais relèvent bien du contrôle tactique implicite au travers du lien entre l'attention spatiale [11] et les routines de vérification [12], tel que mentionné plus haut.

Les influences des processus d'anticipation et de compensation visuelle convergent pour fournir une consigne au système moteur en charge du contrôle du volant. Il est à noter que la Figure 39 représente cette fusion d'information comme une somme de la sortie des deux modules, mais c'est à titre de simplification, car nous avons montré que la pondération de leur contribution est fonction de la fiabilité des informations visuelles proches et lointaines (Frissen & Mars, 2014). Quoi qu'il en soit, cette consigne, assimilable à une intention d'action, doit être convertie en un angle au volant. Il y a donc programmation motrice [17]. La conversion d'un angle cible en un couple exercé au volant passe nécessairement par un modèle interne de la compliance du volant [18]. Le couple effectivement appliqué au volant dépendra de la prise en compte des retours d'effort du système de direction et de la correction des erreurs motrices [20] sur la base de la comparaison entre mouvement désiré et mouvement réalisé. La programmation motrice [17] spécifie les paramètres du mouvement à exécuter, mais elle prépare également la compensation des perturbations anticipées au travers du réglage du gain du module de correction (modulation du gain du réflexe d'étirement, co-contraction agoniste/antagoniste). Cela peut être le cas par exemple lorsque le véhicule est soumis à des bourrasques de vent latéral. Cela suppose des influences descendantes du contrôle tactique implicite au travers des routines d'action [12]. Ces processus de modulation et d'inhibition de l'action permettent la prise en compte du contexte visuel immédiat pour respécifier les paramètres d'un mouvement à exécuter tel que nous l'avons observé dans les expérimentations portant sur l'amorçage haptique du geste (Deroo et al., 2012, 2013; Frissen & Mars, en préparation).

Enfin, nous avons déjà évoqué deux modèles internes dont on peut raisonnablement supposer l'existence au sein du système sensorimoteur : un modèle interne de la compliance des commandes [18] et un modèle interne de la dynamique du véhicule alimenté par les informations inertielles [19]. Leur rôle dans la régulation implicite du risque de sortie de voie au travers de la construction des marges de sécurité et dans la genèse des émergences cognitives a déjà été évoqué. Cependant, l'ensemble des travaux portant sur les retours d'effort au volant et la perception des accélérations latérales montrent leur importance pour le contrôle en ligne de la trajectoire (section 3.1.2). Le premier modèle interne est essentiel pour la réalisation du geste et l'adaptation aux

caractéristiques du système de direction (Toffin et al., 2007). Le second permet de réguler et d'anticiper les accélérations du véhicule, avec un rôle prédominant pour le contrôle longitudinal (régulation du freinage notamment) et moindre, quoique non-négligeable, pour le contrôle latéral (stabilisation du positionnement).

5.2 Application à l'ergonomie des assistances à la conduite

Parasuraman, Sheridan et Wickens (2000) proposent un cadre conceptuel pour mieux déterminer le niveau d'automatisation à privilégier afin d'assister un opérateur dans sa tâche. Pour cela, ils croisent la typologie en termes de niveaux d'automatisation de Sheridan et Verplank (1978) avec quatre classes de processus cognitifs : l'acquisition d'information (traitements sensoriels), l'analyse de l'information (perception et mémoire de travail), la prise de décision (sélection de la réponse) et l'implémentation de l'action. L'approche est intéressante, car elle cherche à guider la question de la répartition de fonction entre l'homme et la machine en intégrant un modèle simplifié du traitement de l'information par l'opérateur dans la démarche de conception. Cependant, la représentation du traitement de l'information en quatre étapes séquentielles ne permet pas une description en termes de niveaux de contrôle. Je vais donc maintenant adopter une démarche similaire en rendant plus explicite la hiérarchie des processus et, ce faisant, les raccourcis possibles entre perception de l'environnement et action sur les commandes du véhicule. En d'autres termes, nous allons essayer de démontrer la pertinence de l'analyse réalisée jusqu'ici pour fournir un cadre conceptuel à la problématique de la conception des assistances à la conduite. Pour cela, je vais balayer les différentes modalités de coopération homme-machine en m'appuyant sur les travaux présentés en section 4. A noter que les points d'insertion des différents dispositifs discutés sont indiqués par les encadrés verts sur la Figure 39.

Pour commencer, prenons le cas de la perception augmentée à l'aide des afficheurs tête-haute (HUD sur la Figure 39). Ces dispositifs, en surimposant des éléments d'information à la scène routière, agissent directement sur l'extraction des indices visuels [16], mais le type de processus impliqués en aval va dépendre de la nature de l'information présentée. Les HUD actuellement commercialisés, parce qu'ils sont de petite taille, sollicitent uniquement la vision focale (Figure 24B). Pour utiliser l'information de nature symbolique qu'ils affichent, le conducteur va orienter son attention vers eux [11], catégoriser [8] et identifier ce à quoi l'information renvoie (vitesse, direction à prendre, etc.). L'information vise donc in fine à alimenter le diagnostic de la situation [6]. Si on considère maintenant le concept présenté par la Figure 24C, qui consiste à projeter sur la chaussée la trajectoire à suivre, le contrôle tactique explicite n'est plus sollicité. L'assistance renseigne directement sur la trajectoire à suivre. On pourrait d'ailleurs imaginer que, plutôt qu'une trajectoire unique supposée optimale, le système affiche une enveloppe de trajectoire acceptable [9]. Guider le véhicule reviendrait à vérifier ou à anticiper à court terme que la trajectoire actuelle ne risque pas de sortir de l'enveloppe préconisée [10 et 12]. Quant à l'approche consistant à guider le regard pour faciliter le contrôle de trajectoire telle que nous l'avons proposée (section 4.2.2), elle vise à alimenter directement le niveau du contrôle sensorimoteur. Parce que le mouvement de la balise visuelle est fonction des changements de courbure de la route, l'assistance fournit un point d'ancrage au regard. Le processus de tracking [13] est facilité. Ce faisant, la coordination visuomotrice qui lie le

processus d'anticipation visuelle de la courbure de la route [14] au contrôle du volant est améliorée.

Considérons maintenant la problématique de la prévention des sorties de voie en reprenant les études comparatives entre l'amorçage haptique du geste de correction de trajectoire et les dispositifs d'alerte (section 4.3.2). La plupart des constructeurs proposent maintenant des dispositifs prévenant le conducteur du fait qu'il est sur le point de franchir un des bords de voie. La configuration la plus souvent répandue consiste en une alerte auditive et/ou une vibration du volant (du siège chez Citroen pour le système AFIL), l'alerte renvoyant souvent à un indicateur visuel sur le tableau de bord. Là encore, le principe est d'améliorer le diagnostic de la situation en informant le conducteur sur l'état de son véhicule dans le monde. J'ai choisi de ne pas représenter sur la Figure 39 l'ensemble des modalités sensorielles par lesquelles peuvent remonter les informations symboliques jusqu'au niveau du contrôle tactique explicite, mais le principe est le même que l'alerte soit délivrée par le biais de la vision, du son, du vibrotactile et de n'importe quelle combinaison multisensorielle. D'ailleurs, les travaux de Navarro et al. (2010, 2007) sont sans appel. Quelle que soit la modalité sensorielle utilisée, avec ou sans redondance, que l'alerte soit latéralisée ou pas, le gain en termes de sécurité est du même ordre. Cela illustre le fait que le même niveau de contrôle est visé à chaque fois puisqu'on fait appel au processus d'identification du signal d'alerte, qui est d'ordre symbolique. L'amorçage haptique du geste a sans aucun doute aussi valeur d'avertissement, mais l'amplitude des bénéfices observés comparativement aux alertes réside dans son action directe au niveau sensorimoteur. Par le biais des impulsions de couple qu'il délivre, il induit une correction motrice [20] dont la direction est univoque. Celle-ci s'exprime par une amélioration de l'exécution du mouvement de correction, plus que par une amélioration du temps de réaction.

Cependant, comme nous l'avons vu, intervenir ponctuellement en situation critique et en sollicitant le niveau sensorimoteur pose deux questions délicates, celle de la contrôlabilité de la réponse induite (section 4.3.3) et celle du ressenti subjectif qui va conditionner l'acceptabilité du système (section 4.3.5). Sur le premier point, nous avons démontré que la réponse induite n'est pas de nature réflexe, involontaire et stéréotypée (Deroo et al., 2013). En effet, la réponse est inhibée de façon précoce lorsqu'un le système perceptif détecte une incohérence entre le sens de l'amorce et le contexte immédiat. La détection précoce de l'incohérence s'effectue au niveau du contrôle tactique implicite par les processus encapsulés de vérification [12] et de régulation du risque [10] qui détermine la trajectoire acceptable [9]. L'effet sur les temps de réaction est cette fois très marqué, avec des réponses initiées entre 300 et 350 ms après le début de la situation critique ce qui exclue l'intervention du contrôle tactique explicite. Par opposition, lorsque le risque est évalué de façon explicite (Deroo et al., 2012), les effets sur la correction de trajectoire ne sont visibles qu'à partir de 750 ms, soit nettement après le début du mouvement, ce qui correspond probablement au temps minimal de la de la mise en œuvre de la boucle du contrôle tactique explicite. Dans ce cas, l'effet du risque perçu ne fait que s'ajouter de façon relativement tardive à l'effet de l'assistance. Ainsi, nous avons démontré les bénéfices de l'amorçage haptique du geste sur la mise en œuvre de l'action au niveau sensorimoteur, tout en pointant les capacités du contrôle tactique implicite à moduler, voire inhiber, la réponse en fonction du contexte immédiat. En revanche, concernant la question de l'acceptabilité du système, les résultats sont moins encourageants. Il

semblerait que l'action ponctuelle du dispositif sur le système moteur génère des émergences cognitives délétères. Il est à noter que le problème n'est pas spécifique à l'amorçage haptique. Toutes les modalités d'alerte étudiées dans Navarro et al. (2010) ont été évaluée globalement de façon négative de par leur caractère interruptif et alarmant, et ceci en dépit d'une réelle utilité perçue. Cependant, les entretiens d'acceptabilité pointent un problème spécifique à l'amorçage haptique, celui d'un sentiment d'intrusivité du système dans le contrôle du véhicule, qui semble rédhibitoire.

La dissociation entre performance et acceptabilité n'est pas apparue dans les travaux que nous avons réalisé sur le contrôle partagé du volant (Mars et al., 2014b), ce qui montre bien que ce n'est pas le fait de solliciter le contrôle sensorimoteur, et la modalité haptique en particulier, qui pose problème. La différence fondamentale réside dans le fait que, pour le contrôle partagé, l'action du système n'est pas ponctuelle mais vise à s'insérer de façon continue dans la boucle sensorimotrice du contrôle du volant. Cela passe par une modification des forces restituées par le système de direction. On passe d'une direction classique qui fournit un retour d'effort utile à la stabilisation du contrôle de trajectoire à un système qui participe activement à la réalisation du guidage. L'enjeu est donc en premier lieu de concevoir une loi de commande qui agissent en cohérence avec le comportement du conducteur, voire en anticipation, ce qui implique la prise en compte d'un modèle du conducteur qui représente les boucles sensorimotrices. Notre effort dans ce sens a donné des résultats très encourageants (Mars et al., 2011; Saleh et al., 2013). Par ailleurs, nos travaux sur l'étude de la coopération homme-machine en situation de contrôle partagé pointe le rôle primordial de la mise à jour du modèle interne des propriétés dynamiques du volant [18]. Celle-ci s'effectue de façon très rapide, dès les premières minutes d'utilisation, ce qui suggère une adaptation de type paramétrique, avec une consolidation progressive de l'apprentissage moteur (Mars et al., 2014a). C'est tout du moins le cas lorsque le guidage haptique est modéré. Lorsque le guidage devient plus persuasif, des interférences négatives apparaissent ce qui pourrait témoigner des limites de l'adaptation paramétrique du modèle interne. Avec un guidage aux limites des capacités de cette adaptation, les incohérences qui peuvent exister entre les prédictions du modèle conducteur et l'action réelle du conducteur lui-même peuvent apparaître au niveau du contrôle tactique implicite [12], générant des actions de compétition pour le contrôle du volant (Mars et al., 2014b). En revanche nous avons bien mis en évidence que lorsque la répartition du partage est adéquate, l'action du dispositif ne s'accompagne d'aucune forme de supervision du contrôle tactique explicite telle qu'on peut l'observer dans des situations de conduite déléguée (Mars et al., 2014a). Cela témoigne du fait que le contrôle partagé ne modifie pas fondamentalement l'organisation hiérarchique des processus de contrôle du véhicule.

Au contraire du contrôle partagé, la délégation de conduite, problématique on ne peut plus actuelle dans le contexte du développement des véhicules autonomes, va bouleverser l'activité de conduite. Cette fois, le contrôle opérationnel du véhicule est entièrement confié à un automate, ce qui revient à neutraliser le contrôle sensorimoteur et à placer le conducteur en situation de supervision. Dans cette perspective, le contrôle tactique explicite pourrait être le niveau le plus sollicité, mais les problématiques de recherche à venir concerneront bien l'ensemble de la hiérarchie. C'est ce qu'illustrent les travaux exploratoires que nous avons mené sur la délégation du contrôle latéral (Mars & Navarro, 2012; Navarro et al., soumis). L'interruption de la boucle de contrôle

sensorimotrice pose la question de sa réactivation en amont du retour au contrôle manuel. Nous avons montré en particulier une modification des stratégies de prise d'information au niveau tactique implicite vers plus d'anticipation à long terme au détriment des prises d'information à moyen terme qui sous-tendent le contrôle de trajectoire. Par ailleurs, il sera nécessaire de prévenir le risque de complaisance vis-à-vis du système au niveau tactique explicite. Cela implique la nécessité de réaliser un monitoring du conducteur pour évaluer en continu sa capacité à reprendre le contrôle du véhicule à tous les niveaux, mais également de lui fournir un certain nombre d'entrées pour chacun de ces niveaux.

5.3 Sur la route de l'avenir

Ce travail réalisé pour l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches se veut être une contribution théorique sur l'organisation des niveaux de contrôle du comportement dans l'activité de conduite automobile. Ce faisant, elle fournit un cadre conceptuel pour la suite de mes travaux. Au-delà des perspectives déjà mentionnées au fil du document et qui concernent les suites directes des travaux réalisés, je vais esquisser quelques pistes supplémentaires pour l'avenir.

Nous avons engagé récemment des travaux sur l'évaluation de l'aptitude à la conduite chez les patients souffrant de déficits visuels, tels que le glaucome et la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA). L'enjeu principal pour ces populations est de savoir s'ils vont pouvoir continuer à réaliser leurs tâches quotidiennes. Parmi celles-ci, la conduite automobile, synonyme d'autonomie dans les déplacements, est particulièrement cruciale. Si les progrès médico-technologiques récents permettent de quantifier de mieux en mieux les atteintes structurelles et fonctionnelles du système visuel, il est souvent bien difficile en consultation de déterminer avec précision l'impact des troubles sur la tâche de conduite. Les raisons sont de deux ordres. Premièrement, la plupart des tests sont de nature statique, alors que la conduite est une tâche hautement dynamique qui repose à la fois sur les visions centrale et périphérique. Deuxièmement, chaque patient peut mettre en place des stratégies de compensation qui s'avèrent parfois être efficaces. Ces stratégies peuvent être explicites ou implicites. L'objectif est donc de préciser de quelle manière les processus sensorimoteurs et cognitifs sont impactés par le déficit visuel. Il s'agit en particulier de déterminer comment les mécanismes de compensation sont mis en œuvre par les patients et les conditions de leurs mises en défaut. A terme, une des solutions pourrait être de mettre en place des procédures d'apprentissage en simulateur de conduite pour aider les patients à mettre en place des stratégies de compensation efficaces tout en ayant conscience de leurs limites. Plus généralement, ces travaux pourraient être étendus à d'autres populations présentant des déficits perceptifs, cognitifs ou moteurs.

Pour aider les populations fragilisées, une autre piste de recherche pourrait résider dans la convergence entre la problématique de l'évaluation des aptitudes à la conduite, d'une part, et de l'assistance au conducteur, d'autre part. Il s'agirait d'évaluer si les bénéfices associés à différentes modalités d'assistance dans la population normale sont retrouvés chez des conducteurs présentant des déficits ou, si nécessaire, d'adapter les solutions aux déficits. En effet, si les dispositifs d'aide ont a priori le potentiel de pallier aux pertes de compétence observées chez les populations sensibles, il convient de déterminer si les

déficits ne forment pas un obstacle à l'établissement d'une coopération satisfaisante entre le conducteur et l'assistance. Par exemple, guider le regard en perception augmentée pourrait être envisagé comme un moyen de remédiation aux altérations des stratégies d'exploration visuelle, à condition toutefois d'éviter tout phénomène de focalisation attentionnelle qui pourrait être induit par l'interface. De la même manière, intervenir directement au niveau du contrôle du geste pourrait être une solution prometteuse pour des patients souffrant de troubles moteurs. La question serait alors de déterminer comment insérer l'action du dispositif dans la boucle sensorimotrice chez des individus dont la sensibilité proprioceptive ou la motricité est dégradée.

La voiture autonome offre également des perspectives enthousiasmantes pour les personnes souffrant de handicap, mais l'essentiel des recherches à venir va bien évidemment concerner l'ensemble des conducteurs. Parmi les nombreuses questions qui se posent aux chercheurs qui travaillent sur le rôle des facteurs humains en conduite autonome, j'ai l'intention d'en investir deux en particulier.

La première concerne le monitoring de l'état du conducteur pendant les phases de conduite autonome, avec en particulier la question de l'évolution des stratégies visuelles au fil de l'usage. L'influence de la délégation du contrôle véhiculaire sur les prises d'information a déjà été démontrée, mais les conséquences de ces adaptations ne sont pas décrites de façon univoque. Mackenzie et Harris (2015), par exemple, ont montré un plus grand balayage de la scène visuelle en situation de conduite passive, avec des fixations plus lointaines. Ils rapportent également une plus grande capacité à détecter des dangers potentiels, ce qui suggère qu'une moindre charge sur les systèmes visuels et attentionnels se traduit en de meilleures capacités à détecter d'éventuels aléas en amont de la reprise en main. En revanche, Mars et Navarro (2012) ont montré qu'en situation de délégation du contrôle du véhicule à un automate, les prises d'information évoluent vers plus d'anticipation à long terme, au détriment des prises d'information nécessaires au guidage du véhicule, pourtant nécessaires à l'alimentation du contrôle sensorimoteur. Le projet visera donc à préciser la nature des adaptations visuomotrices et cognitives. L'accent sera porté sur la recherche de marqueurs du désengagement ou du réengagement du conducteur dans le contrôle actif du véhicule, au travers de modèles statistiques de l'évolution des stratégies visuelles. Deux approches récemment appliquées à la modélisation des stratégies visuelles en situation de distraction s'avèrent prometteuses en particulier : l'une est basée sur la modélisation par coefficient aléatoire (Peng & Boyle, 2015) et l'autre sur les réseaux bayésiens hybrides (Liang & Lee, 2014). Nous chercherons à transposer cette approche à la problématique du monitoring du conducteur en situation de conduite autonome.

La seconde question relative au véhicule autonome sera celle des interactions entre automate et conducteur au travers des actionneurs. Lors des transitions entre conduite déléguée et conduite manuelle, il s'agit de déterminer comment assurer une transition sûre et souple du contrôle des actionneurs, et en particulier du volant. Il peut s'agir aussi de permettre au conducteur de participer ponctuellement à l'exécution d'une manœuvre sans toutefois désengager le système de conduite autonome (e.g. gérer un dépassement). Afin d'introduire une forme de progressivité dans la mise en œuvre des transitions, nous chercherons à mettre en œuvre une phase de contrôle partagé de la direction du véhicule. Le dispositif agira comme un copilote en fournissant un guidage haptique de plus en plus fort (ou de moins en moins fort, selon le sens de la transition) sur un

intervalle de temps qui pourra être fixe ou variable. Cela impliquera un travail en amont sur l'évolution du modèle du conducteur qui sous-tend le contrôle partagé (Mars et al., 2011; Saleh et al., 2013). D'un point de vue technique, nous réaliserons la synthèse d'une ou plusieurs lois de commande pour lesquelles le critère de partage sera un paramètre variant. Une fois l'implémentation réalisée, il restera à évaluer en situation la qualité de la coopération homme-machine.

Un champ connexe à la conduite automobile est celui de la conduite de véhicules deux-roues motorisés. Le problème a bien entendu de nombreux points communs avec celle de la conduite automobile, mais elle pose aussi des questions spécifiques liées au contrôle de l'inclinaison du véhicule. Mes premiers travaux sur la question ont concerné l'opportunité de restituer en simulateur moto l'inclinaison du véhicule au travers d'un roulis dynamique de la scène visuelle (Lobjois, Siegler, & Mars, 2016). Nous avons montré que si les patterns d'exploration de la scène visuelle sont globalement préservés en situation de roulis visuel, les conducteurs prenaient davantage d'information très anticipatives et moins d'information le long de la trajectoire future. Ces résultats suggèrent une plus grande difficulté à réaliser la tâche de coordination visuomotrice, en cohérence avec une baisse de la stabilité du contrôle latéral. Les travaux à venir seront réalisés dans le cadre du projet ANR VIROLO++. Ils porteront sur la modélisation cybernétique du conducteur de deux-roues en conduite réelle. Il s'agira de représenter dans le modèle, en plus du contrôle visuel de la trajectoire, la gestion des inclinaisons au travers des informations vestibulaires (régulations gravito-inertielles) et haptiques (gestions des appuis sur le véhicule). La question des stratégies implicites mises en œuvre sera également posée dans la mesure où certains conducteurs déclarent utiliser des stratégies d'inclinaison différentes en privilégiant la technique dite du contre-braquage, alors que d'autres disent utiliser davantage le poids du corps appliqué aux points d'appui sur la moto.

Enfin, si le modèle SIES a été développé dans le contexte de la conduite automobile, il se veut générique et pourrait donc être appliqué à d'autres classes de situation d'interaction homme-machine, à partir du moment où il s'agit de situations dynamiques à forte composante perceptivo-motrice. La robotique offre des perspectives intéressantes à cet égard. On peut citer les situations de téléopération qui se caractérisent parfois par une dimension de manipulation avec des retours sensoriels partiels et la nécessaire mise en place de stratégies implicites ou explicites pour s'adapter au système commandé. Une autre perspective prometteuse est celle de la cobotique, et notamment celle des interactions avec les robots humanoïdes. Si ceux-ci sont actuellement à un niveau de maturité technologique qui limite le degré d'interaction avec l'homme, les avancées récentes sont impressionnantes. Elles augurent de la nécessité d'un modèle complet du comportement humain pour que la coopération dans des tâches complexes et dynamiques puisse s'établir.

6. Bibliographie

- Abbink, D. A., Mulder, M., & Boer, E. R. (2012). Haptic shared control: smoothly shifting control authority? *Cognition Technology & Work*, 14(1), 19-28. <http://doi.org/10.1007/s10111-011-0192-5>
- Aglioti, S., DeSouza, J. F., & Goodale, M. A. (1995). Size-contrast illusions deceive the eye but not the hand. *Current Biology*, 5(6), 679-685.
- Ameyoe, A., Mars, F., Chevrel, P., Le Carpentier, E., & Illy, H. (2015). Estimation of driver distraction using the prediction error of a cybernetic driver model. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2015* (p. 13-18). Tübingen.
- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C., & Qin, Y. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological Review*, 111(4), 1036-1060. <http://doi.org/10.1037/0033-295X.111.4.1036>
- Anema, H. A., van Zandvoort, M. J. E., de Haan, E. H. F., Kappelle, L. J., de Kort, P. L. M., Jansen, B. P. W., & Dijkerman, H. C. (2009). A double dissociation between somatosensory processing for perception and action. *Neuropsychologia*, 47(6), 1615-1620. <http://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.11.001>
- Ansorge, U., Neumann, O., Becker, S. I., Kälberer, H., & Cruse, H. (2007). Sensorimotor supremacy: Investigating conscious and unconscious vision by masked priming. *Advances in Cognitive Psychology*, 3(1-2), 257-274. <http://doi.org/10.2478/v10053-008-0029-9>
- Authié, C. N., & Mestre, D. R. (2011). Optokinetic nystagmus is elicited by curvilinear optic flow during high speed curve driving. *Vision Research*, 51(16), 1791-1800. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2011.06.010>
- Authié, C. N., & Mestre, D. R. (2012). Path curvature discrimination: dependence on gaze direction and optical flow speed. *PLoS One*, 7(2), e31479. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0031479>
- Baars, B. J. (2002). The conscious access hypothesis: origins and recent evidence. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(1), 47-52.
- Badre, D. (2008). Cognitive control, hierarchy, and the rostro-caudal organization of the frontal lobes. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(5), 193-200. <http://doi.org/10.1016/j.tics.2008.02.004>
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *The Behavioral and Brain Sciences*, 22(4), 577-609; discussion 610-660.
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 617-645. <http://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>
- Barsalou, L. W. (2010). Grounded Cognition: Past, Present, and Future. *Topics in Cognitive Science*, 2(4), 716-724. <http://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2010.01115.x>
- Bekkering, H., & Sailer, U. (2002). Commentary: Coordination of eye and hand in time and space. In J. Hyona, D. P. Munoz, W. Heide, & R. Radach (éd.), *Brain's Eye: Neurobiological and Clinical Aspects of Oculomotor Research* (Vol. 140, p. 365-373). Amsterdam: Elsevier Science Bv.
- Berthoz, A., Bles, W., Bulthoff, H. H., Correia Gracio, B. J., Feenstra, P., Filliard, N., ... Wentink, M. (2013). Motion Scaling for High-Performance Driving Simulators. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 43(3), 265-276. <http://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2242885>
- Billington, J., Field, D. T., Wilkie, R. M., & Wann, J. P. (2010). An fMRI study of parietal cortex involvement in the visual guidance of locomotion. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 36(6), 1495-1507. <http://doi.org/10.1037/a0018728>
- Billington, J., Wilkie, R. M., & Wann, J. P. (2013). Obstacle avoidance and smooth trajectory control: neural areas highlighted during improved locomotor performance. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 7, 9. <http://doi.org/10.3389/fnbeh.2013.00009>
- Blana, E., & Golias, J. (2002). Differences between vehicle lateral displacement on the road and in a fixed-base simulator. *Human Factors*, 44(2), 303-313.

- Blaschke, C., Breyer, F., Färber, B., Freyer, J., & Limbacher, R. (2009). Driver distraction based lane-keeping assistance. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12(4), 288-299. <http://doi.org/10.1016/j.trf.2009.02.002>
- Boer, E. R. (1996). Tangent point oriented curve negotiation. In *Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium* (p. 7-12). <http://doi.org/10.1109/IVS.1996.566341>
- Boy, P. G. A. (2012). *The Handbook of Human-Machine Interaction: A Human-Centered Design Approach*. Ashgate Publishing, Ltd.
- Bresciani, J.-P., Ernst, M. O., Drewing, K., Bouyer, G., Maury, V., & Kheddar, A. (2005). Feeling what you hear: auditory signals can modulate tactile tap perception. *Experimental Brain Research*, 162(2), 172-180. <http://doi.org/10.1007/s00221-004-2128-2>
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. Pergamon Press.
- Cacciabue, P. C. (2007). *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments: Critical Issues in Driver Interactions with Intelligent Transport Systems*. London: Springer.
- Cardoso-Leite, P., & Gorea, A. (2010). On the perceptual/motor dissociation: a review of concepts, theory, experimental paradigms and data interpretations. *Seeing and Perceiving*, 23(2), 89-151. <http://doi.org/10.1163/187847510X503588>
- Carriot, J., Bringoux, L., Charles, C., Mars, F., Nougier, V., & Cian, C. (2004). Perceived body orientation in microgravity: Effects of prior experience and pressure under the feet. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 75(9), 795-799.
- Carsten, O., Lai, F. C. H., Barnard, Y., Jamson, A. H., & Merat, N. (2012). Control task substitution in semiautomated driving: does it matter what aspects are automated? *Human Factors*, 54(5), 747-761.
- Cloete, S., & Wallis, G. (2011). Visuomotor control of steering: the artefact of the matter. *Experimental Brain Research*, 208(4), 475-489. <http://doi.org/10.1007/s00221-010-2530-x>
- Comte, S., Wardman, M., & Whelan, G. (2000). Drivers' acceptance of automatic speed limiters: implications for policy and implementation. *Transport Policy*, 7(4), 259-267. [http://doi.org/10.1016/S0967-070X\(00\)00017-2](http://doi.org/10.1016/S0967-070X(00)00017-2)
- Cooke, J. D. (1980). 11 The Organization of Simple, Skilled Movements. In G. E. S. and J. Requin (éd.), *Advances in Psychology* (Vol. 1, p. 199-212). North-Holland.
- Darses, F., Hoc, J.-M., & Chauvin, C. (2004). Cadres théoriques et méthodes de production de connaissances en psychologie ergonomique. In J.-M. Hoc & F. Darses (éd.), *Psychologie ergonomique: tendances actuelles* (p. 221-251). Paris: Presses Universitaires de France.
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., & Kemeny, A. (2012). Toward predicting the subjective assessment of ESC in a driving simulator. In A. Kemeny, F. Mérienne, & S. Espié (éd.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012* (p. 289-298). Paris: Les collections de l'IFSTTAR.
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., Reymond, G., & Kemeny, A. (2011). Drivers' Perception of Loss of Adherence in Bends: Influence of Motion Rendering. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11(4), 041004. <http://doi.org/10.1115/1.3622752>
- Denoual, T., Petiot, J.-F., Mars, F., & Kemeny, A. (2012). Predicting the subjective evaluation of drivers in a driving simulator during loss of adherence. In *Proceedings of the ASME 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA2012)* (Vol. 2, p. 773-780).
- Deroo, M., Hoc, J.-M., & Mars, F. (2012). Influence of risk expectation on haptically cued corrective manoeuvres during near lane departure. *Ergonomics*, 55(4), 465-475. <http://doi.org/10.1080/00140139.2011.647094>
- Deroo, M., Hoc, J.-M., & Mars, F. (2013). Effect of strength and direction of haptic cueing on steering control during near lane departure. *Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour*, 16, 92-103. <http://doi.org/10.1016/j.trf.2012.08.015>
- De Winter, J. C. F., & Dodou, D. (2011). Preparing drivers for dangerous situations: A critical reflection on

- continuous shared control. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (p. 1050-1056). <http://doi.org/10.1109/ICSMC.2011.6083813>
- Dijkerman, H. C., & de Haan, E. H. F. (2007). Somatosensory processes subserving perception and action. *Behavioral and Brain Sciences*, *30*(02), 189-201. <http://doi.org/10.1017/S0140525X07001392>
- Donges, E. (1978). 2-Level Model of Driver Steering Behavior. *Human Factors*, *20*(6), 691-707.
- Donges, E. (1999). A Conceptual Framework for Active Safety in Road Traffic. *Vehicle System Dynamics*, *32*(2-3), 113-128. <http://doi.org/10.1076/vesd.32.2.113.2089>
- El-Jaafari, M., Forzy, J.-F., Navarro, J., Mars, F., & Hoc, J.-M. (2008). User acceptance and effectiveness of warning and motor priming assistance devices in car driving. In *Proceedings of European conference on human centred design for intelligent transport systems* (p. 311-320). Lyon: HUMANIST Publications.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, *37*(1), 32-64.
- Essma, S. (2000). Steering Effort Analysis of an Oval Racing Track Setup Champ Car. In *Proceedings of the 2000 International ADAMS User Conference*. Orlando, FL.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, *47*(6), 381-391. <http://doi.org/10.1037/h0055392>
- Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). *Human performance*. Brooks/Cole Pub. Co.
- Flanagan, J. R., & Johansson, R. S. (2003). Action plans used in action observation. *Nature*, *424*(6950), 769-771. <http://doi.org/10.1038/nature01861>
- Fodor, J. A. (1983). *The Modularity of Mind: An Essay on Faculty Psychology*. MIT Press.
- Forsyth, B. A. C., & MacLean, K. E. (2006). Predictive haptic guidance: intelligent user assistance for the control of dynamic tasks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *12*(1), 103-113. <http://doi.org/10.1109/TVCG.2006.11>
- Frissen, I., & Mars, F. (en préparation). Motor preparation of lane changes while driving using visual and haptic advanced information.
- Frissen, I., & Mars, F. (2014). The effect of visual degradation on anticipatory and compensatory steering control. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *67*(3), 499-507. <http://doi.org/10.1080/17470218.2013.819518>
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis and Prevention*, *37*(3), 461-472. <http://doi.org/10.1016/j.aap.2004.11.003>
- Fuster, J. M. (2004). Upper processing stages of the perception-action cycle. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(4), 143-145.
- Gabbard, J. L., Fitch, G. M., & Kim, H. (2014). Behind the Glass: Driver Challenges and Opportunities for AR Automotive Applications. *Proceedings of the IEEE*, *102*(2), 124-136. <http://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2294642>
- Gallen, R., & Glaser, S. (2009). Vision Based Tangent Point Detection Algorithm, Evaluation and Validation. In *Proceedings of the IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA 2009)* (p. 518-521). Yokohama (Japan).
- Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J., & Crooks, L. E. (1938). A theoretical field-analysis of automobile-driving. *The American Journal of Psychology*, *51*, 453-471. <http://doi.org/10.2307/1416145>
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, *15*(1), 20-25. [http://doi.org/10.1016/0166-2236\(92\)90344-8](http://doi.org/10.1016/0166-2236(92)90344-8)
- Greenberg, J., Artz, B., & Cathey, L. (2003). The effect of lateral motion cues during simulated driving. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference North America 2003* (Vol. CD-ROM). Dearborn, USA.

- Green, P., Gillespie, T., Reifes, S., Wei-Haas, L., & Ottens, D. (1984). *Subjective Evaluation of Steering Effort Levels* (No. UMTRI -84-39). University of Michigan, Transportation Research Institute.
- Griffiths, P. G., & Gillespie, R. B. (2005). Sharing control between humans and automation using haptic interface: Primary and secondary task performance benefits. *Human Factors*, 47(3), 574-590. <http://doi.org/10.1518/001872005774859944>
- Griffiths, P., & Gillespie, R. B. (2004). Shared control between human and machine: haptic display of automation during manual control of vehicle heading. In *Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'04)*. (p. 358-366). <http://doi.org/10.1109/HAPTIC.2004.1287222>
- Gurfinkel, V. S., & Levick, Y. S. (1991). Perceptual and automatic aspects of the postural body scheme. In J. Paillard (éd.), *Brain and space* (p. 147-162). Oxford: Oxford University Press.
- Halit, L., Kemeny, A., Le Gouguec, A., Mérienne, F., & Mohellebi, H. (2015). Head Motion parallax effect on driving performances when using an AR-HUD: Simulation Study on Renault's CARDS Simulator. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference - Europe 2015* (7 pp.). Tübingen.
- Hatakka, M., Keskinen, E., Gregersen, N. P., Glad, A., & Hernetkoski, K. (2002). From control of the vehicle to personal self-control; broadening the perspectives to driver education. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5(3), 201-215. [http://doi.org/10.1016/S1369-8478\(02\)00018-9](http://doi.org/10.1016/S1369-8478(02)00018-9)
- Hayhoe, M. M., & Rothkopf, C. A. (2011). Vision in the natural world. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Cognitive Science*, 2(2), 158-166. <http://doi.org/10.1002/wcs.113>
- Hess, R. A., & Modjtahedzadeh, A. (1990). A control theoretic model of driver steering behavior. *IEEE Control Systems Magazine*, 10(5), 3-8. <http://doi.org/10.1109/37.60415>
- Hillstrom, A. P., & Yantis, S. (1994). Visual motion and attentional capture. *Perception & Psychophysics*, 55(4), 399-411.
- Hochstein, S., & Ahissar, M. (2002). View from the top: hierarchies and reverse hierarchies in the visual system. *Neuron*, 36(5), 791-804.
- Hoc, J.-M. (2000). From human-machine interaction to human-machine cooperation. *Ergonomics*, 43(7), 833-843. <http://doi.org/10.1080/001401300409044>
- Hoc, J.-M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(2), 22-55.
- Hoc, J.-M., Mars, F., Milleville-Pennel, I., Jolly, E., Netto, M., & Blosseville, J. M. (2006). Human-machine cooperation in car driving for lateral safety: Delegation and mutual control. *Travail Humain*, 69(2), 153-182.
- Hoc, J.-M., Young, M. S., & Blosseville, J.-M. (2009). Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10(2), 135-160. <http://doi.org/10.1080/14639220802368856>
- Hoedemaeker, M., & Brookhuis, K. A. (1998). Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC). *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour*, 1(2), 95-106. [http://doi.org/10.1016/S1369-8478\(98\)00008-4](http://doi.org/10.1016/S1369-8478(98)00008-4)
- Hofmann, P., & Rinkeauer, G. (2013). Response preparation in a lane change task. *Ergonomics*, 56(2), 268-281. <http://doi.org/10.1080/00140139.2012.760752>
- Hollnagel, E. (2002). Time and time again. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 143-158. <http://doi.org/10.1080/14639220210124111>
- Hollnagel, E. (2006). A function-centred approach to joint driver-vehicle system design. *Cognition, Technology & Work*, 8(3), 169-173. <http://doi.org/10.1007/s10111-006-0032-1>
- Hollnagel, E., Karlsson, J., Magnusson, T., & Taube, U. (2001). They drive at night - Can visual enhancement systems keep the driver in control? (p. 202-207). Présenté à First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design.

- Hollnagel, E., N bo, A., & Lau, I. (2003). A systemic model for Driver-in-Control (p. 86-91). Présenté   Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design.
- Hollnagel, E., & Woods, D. D. (1983). Cognitive systems engineering: new wine in new bottles. *International Journal of Man-Machine Studies*, 18(6), 583-600. [http://doi.org/10.1016/S0020-7373\(83\)80034-0](http://doi.org/10.1016/S0020-7373(83)80034-0)
- Hommel, B. (2007). Consciousness and Control: Not Identical Twins. *Journal of Consciousness Studies*, 14(1-1), 155-176.
- Hommel, B. (2013). Dancing in the dark: no role for consciousness in action control. *Cognition*, 380. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00380>
- Horrey, W. J., Wickens, C. D., & Alexander, A. L. (2003). The Effects of Head-Up Display Clutter and In-Vehicle Display Separation on Concurrent Driving Performance. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 47(16), 1880-1884. <http://doi.org/10.1177/154193120304701610>
- Hoult, W., & Cole, D. J. (2008). A neuromuscular model featuring co-activation for use in driver simulation. *Vehicle System Dynamics*, 46, 175-189. <http://doi.org/10.1080/00423110801935798>
- Huang, V. S., & Shadmehr, R. (2009). Persistence of Motor Memories Reflects Statistics of the Learning Event. *Journal of Neurophysiology*, 102(2), 931-940. <http://doi.org/10.1152/jn.00237.2009>
- Huang, Z., Wu, Y., & Liu, J. (2015). Research on effects of pattern, amplitude and frequency of pulse steering torque warnings for lane departure. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 31, 67-76. <http://doi.org/10.1016/j.trf.2015.03.008>
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *The Journal of Physiology*, 195(1), 215-243.
- Imamizu, H., Kuroda, T., Miyauchi, S., Yoshioka, T., & Kawato, M. (2003). Modular organization of internal models of tools in the human cerebellum. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(9), 5461-5466. <http://doi.org/10.1073/pnas.0835746100>
- Itti, L., & Koch, C. (2001). Computational modelling of visual attention. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(3), 194-203. <http://doi.org/10.1038/35058500>
- James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. New York: Dover Publications.
- Johansson, R. S., Westling, G. R., Backstrom, A., & Flanagan, J. R. (2001). Eye-hand coordination in object manipulation. *Journal of Neuroscience*, 21(17), 6917-6932.
- Jordan, T. C. (1972). Characteristics of visual and proprioceptive response times in the learning of a motor skill. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 24(4), 536-543. <http://doi.org/10.1080/14640747208400313>
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall.
- Kandil, F. I., Rotter, A., & Lappe, M. (2009). Driving is smoother and more stable when using the tangent point. *Journal of Vision*, 9(1). <http://doi.org/10.1167/9.1.11>
- Kandil, F. I., Rotter, A., & Lappe, M. (2010). Car drivers attend to different gaze targets when negotiating closed vs. open bends. *Journal of Vision*, 10(4). <http://doi.org/10.1167/10.4.24>
- Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 31-37. [http://doi.org/10.1016/S1364-6613\(02\)00011-6](http://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)00011-6)
- Kiebel, S. J., Daunizeau, J., & Friston, K. J. (2008). A hierarchy of time-scales and the brain. *PLoS Computational Biology*, 4(11), e1000209. <http://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000209>
- Kim, N. G., & Turvey, M. T. (1999). Eye movements and a rule for perceiving direction of heading. *Ecological Psychology*, 11(3), 233-248. http://doi.org/10.1207/s15326969eco1103_3
- Knoblich, G., & Kircher, T. T. J. (2004). Deceiving oneself about being in control: conscious detection of changes in visuomotor coupling. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30(4), 657-666. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.30.4.657>

- Koechlin, E., Basso, G., Pietrini, P., Panzer, S., & Grafman, J. (1999). The role of the anterior prefrontal cortex in human cognition. *Nature*, 399(6732), 148-151. <http://doi.org/10.1038/20178>
- Koechlin, E., Ody, C., & Kouneiher, F. (2003). The architecture of cognitive control in the human prefrontal cortex. *Science*, 302(5648), 1181-1185. <http://doi.org/10.1126/science.1088545>
- Kullack, A., Ehrenpfordt, I., Lemmer, K., & Eggert, F. (2008). ReflektAS: lane departure prevention system based on behavioural control. *IET Intelligent Transport Systems*, 2(4), 285-293. <http://doi.org/10.1049/iet-its:20080031>
- Lacquaniti, F., Borghese, N. A., & Carrozzo, M. (1992). Internal models of limb geometry in the control of hand compliance. *The Journal of Neuroscience*, 12(5), 1750-1762.
- Land, M. F. (1998). The visual control of steering. In Harris, L.R. & Jenkin, M. (éd.), *Vision and Action* (p. 163-180). Cambridge: Cambridge University Press.
- Land, M. F. (2001). Does steering a car involve perception of the velocity flow field? In J. M. Zanker & J. Zeil (éd.), *Motion Vision - Computational, Neural, and Ecological Constraints*. Berlin: Springer-Verlag.
- Land, M. F. (2006). Eye movements and the control of actions in everyday life. *Progress in Retinal and Eye Research*, 25(3), 296-324. <http://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2006.01.002>
- Land, M. F. (2009). Vision, eye movements, and natural behavior. *Visual Neuroscience*, 26(1), 51-62. <http://doi.org/10.1017/S0952523808080899>
- Land, M. F., & Horwood, J. (1995). Which Parts of the Road Guide Steering. *Nature*, 377(6547), 339-340. <http://doi.org/10.1038/377339a0>
- Land, M. F., & Lee, D. N. (1994). Where We Look When We Steer. *Nature*, 369(6483), 742-744. <http://doi.org/10.1038/369742a0>
- Land, M. F., & Tatler, B. W. (2001). Steering with the head. the visual strategy of a racing driver. *Current Biology*, 11(15), 1215-1220.
- Lappi, O. (2014). Future path and tangent point models in the visual control of locomotion in curve driving. *Journal of Vision*, 14(12), 1-22. <http://doi.org/10.1167/14.12.21>
- Layton, O. W., & Browning, N. A. (2014). A unified model of heading and path perception in primate MSTd. *PLoS Computational Biology*, 10(2), e1003476. <http://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003476>
- Lazzari, S., Vercher, J. L., & Buizza, A. (1997). Manuo-ocular coordination in target tracking .1. A model simulating human performance. *Biological Cybernetics*, 77(4), 257-266. <http://doi.org/10.1007/s004220050386>
- Lehtonen, E., Lappi, O., Koirikivi, I., & Summala, H. (2014). Effect of driving experience on anticipatory look-ahead fixations in real curve driving. *Accident Analysis and Prevention*, 70, 195-208. <http://doi.org/10.1016/j.aap.2014.04.002>
- Lehtonen, E., Lappi, O., Kotkanen, H., & Summala, H. (2013). Look-ahead fixations in curve driving. *Ergonomics*, 56(1), 34-44. <http://doi.org/10.1080/00140139.2012.739205>
- Leonard, J. A. (1958). Partial Advance Information in a Choice Reaction Task. *British Journal of Psychology*, 49(2), 89-96. <http://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1958.tb00644.x>
- Liang, Y., & Lee, J. D. (2014). A hybrid Bayesian Network approach to detect driver cognitive distraction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 146-155. <http://doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.004>
- Libet, B. W. (1985). Unconscious Cerebral Initiative and the Role of Conscious Will in Voluntary Action. *Behavioral and Brain Sciences*, 8(4), 529-66.
- Liu, H., Agam, Y., Madsen, J. R., & Kreiman, G. (2009). Timing, timing, timing: fast decoding of object information from intracranial field potentials in human visual cortex. *Neuron*, 62(2), 281-290. <http://doi.org/10.1016/j.neuron.2009.02.025>
- Lobjois, R., Siegler, I. A., & Mars, F. (2016). Effects of visual roll on steering control and gaze behavior in a

- motorcycle simulator. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 38, 55-66. <http://doi.org/10.1016/j.trf.2016.01.002>
- Logan, G. D., & Crump, M. J. C. (2009). The left hand doesn't know what the right hand is doing: the disruptive effects of attention to the hands in skilled typewriting. *Psychological Science*, 20(10), 1296-1300. <http://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02442.x>
- Macadam, C. C. (2003). Understanding and Modeling the Human Driver. *Vehicle System Dynamics*, 40(1-3), 101-134. <http://doi.org/10.1076/vesd.40.1.101.15875>
- Mackenzie, A. K., & Harris, J. M. (2015). Eye movements and hazard perception in active and passive driving. *Visual Cognition*, 23(6), 736-757. <http://doi.org/10.1080/13506285.2015.1079583>
- Macuga, K. L., Beall, A. C., Kelly, J. W., Smith, R. S., & Loomis, J. M. (2006). Changing lanes: inertial cues and explicit path information facilitate steering performance when visual feedback is removed. *Experimental Brain Research*, 178(2), 141-150. <http://doi.org/10.1007/s00221-006-0718-x>
- Malcom, R., Anderson, P., Money, K. E., & Mandler, W. (1978). Peripheral vision horizon device. Consulté à l'adresse <http://www.google.com/patents/US4083239>
- Marchal-Crespo, L., McHughen, S., Cramer, S. C., & Reinkensmeyer, D. J. (2010). The effect of haptic guidance, aging, and initial skill level on motor learning of a steering task. *Experimental Brain Research*, 201(2), 209-220. <http://doi.org/10.1007/s00221-009-2026-8>
- Marple-Horvat, D. E., Chattington, M., Anglesea, M., Ashford, D. G., Wilson, M., & Keil, D. (2005). Prevention of coordinated eye movements and steering impairs driving performance. *Experimental Brain Research*, 163(4), 411-420. <http://doi.org/10.1007/s00221-004-2192-7>
- Mars, F. (2008a). Driving around bends with manipulated eye-steering coordination. *Journal of Vision*, 8(11). <http://doi.org/10.1167/8.11.10>
- Mars, F. (2008b). Steering and Gaze Control Modifications from Directed or Spontaneous Use of a Visual Augmentation Cue. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 52(19), 1541-1545. <http://doi.org/10.1177/154193120805201950>
- Mars, F., Archambault, P. S., & Feldman, A. G. (2003). Vestibular contribution to combined arm and trunk motion. *Experimental Brain Research*, 150(4), 515-519. <http://doi.org/10.1007/s00221-003-1485-6>
- Mars, F., Bringoux, L., Cian, C., Barraud, P. A., Raphel, C., & Vercher, J. L. (2005). Perception of the vertical with a head-fixed visual frame: Implications for using head-mounted displays. *Travail Humain*, 68(2), 125-152.
- Mars, F., Deroo, M., & Charron, C. (2014). Driver adaptation to haptic shared control of the steering wheel. In *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (p. 1524-1528). San Diego.
- Mars, F., Deroo, M., & Hoc, J.-M. (2014). Analysis of human-machine cooperation when driving with different degrees of haptic shared control. *IEEE Transactions on Haptics*, 7(3), 324-333. <http://doi.org/10.1109/TOH.2013.2295095>
- Mars, F., Honoré, J., Richard, C., & Coquery, J. M. (1998). Effects of an illusory orientation of the head on straight-ahead pointing movements. *Cahiers De Psychologie Cognitive-Current Psychology of Cognition*, 17(4-5), 749-762.
- Mars, F., & Navarro, J. (2012). Where We Look When We Drive with or without Active Steering Wheel Control. *Plos One*, 7(8), e43858. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0043858>
- Mars, F., Popov, K., & Vercher, J. L. (2001). Supramodal effects of galvanic vestibular stimulation on the subjective vertical. *Neuroreport*, 12(13), 2991-2994. <http://doi.org/10.1097/00001756-200109170-00047>
- Mars, F., Saleh, L., Chevrel, P., Claveau, F., & Lafay, J.-F. (2011). Modeling the Visual and Motor Control of Steering With an Eye to Shared-Control Automation. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 55, p. 1422-1426). <http://doi.org/10.1177/1071181311551296>
- Mars, F., Vercher, J. L., & Blouin, J. (2004). Perception of the vertical with a head-mounted visual frame

- during head tilt. *Ergonomics*, 47(10), 1116-1130. <http://doi.org/10.1080/00140130410001695933>
- Mars, F., Vercher, J. L., & Popov, K. (2005). Dissociation between subjective vertical and subjective body orientation elicited by galvanic vestibular stimulation. *Brain Research Bulletin*, 65(1), 77-86. <http://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2004.11.012>
- Medeiros-Ward, N., Cooper, J. M., & Strayer, D. L. (2014). Hierarchical control and driving. *Journal of Experimental Psychology. General*, 143(3), 953-958. <http://doi.org/10.1037/a0035097>
- Mennie, N., Hayhoe, M., & Sullivan, B. (2007). Look-ahead fixations: anticipatory eye movements in natural tasks. *Experimental Brain Research*, 179(3), 427-442. <http://doi.org/10.1007/s00221-006-0804-0>
- Mestre, D., Mars, F., Durand, S., Vienne, F., & Espié, S. (2004). A visual aid for curve driving (p. 311-320). Présenté à Proceedings of the Driving Simulation Conference - Europe 2004.
- Mestre, D. R. (2004). Activités sensori-motrices: apports de la réalité virtuelle à la psychologie ergonomique. In J.-M. Hoc & F. Darses (éd.), *Psychologie ergonomique: tendances actuelles* (p. 201-220). Paris: Presses Universitaires de France.
- Miall, R. C., & Reckess, G. Z. (2002). The cerebellum and the timing of coordinated eye and hand tracking. *Brain and Cognition*, 48(1), 212-226. <http://doi.org/10.1006/brcg.2001.1314>
- Michon, J. A. (1985). A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do? In L. Evans & R. C. Schwing (éd.), *Human Behavior and Traffic Safety* (p. 485-520). New York: Plenum Press.
- Milleville-Pennel, I. (2008). A visual sign of lateral acceleration for steering assistance. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66(3), 145-157. <http://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2007.01.003>
- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (2008). Two visual systems re-viewed. *Neuropsychologia*, 46(3), 774-785. <http://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.10.005>
- Moessinger, M., Amalberti, R., Kassagi, M., & Mars, F. (2006). *Méthodologie d'évaluation de l'adaptation comportementale induite par les assistances à la conduite* (Rapport final) (p. 106 pp.). PREDIT.
- Moray, N. (1967). Where is capacity limited? A survey and a model. *Acta Psychologica*, 27, 84-92. [http://doi.org/10.1016/0001-6918\(67\)90048-0](http://doi.org/10.1016/0001-6918(67)90048-0)
- Mulder, M., Abbink, D. A., & Boer, E. R. (2008). The effect of haptic guidance on curve negotiation behavior of young, experienced drivers. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2008. SMC 2008* (p. 804-809). <http://doi.org/10.1109/ICSMC.2008.4811377>
- Mulder, M., Abbink, D. A., & Boer, E. R. (2012). Sharing control with haptics: seamless driver support from manual to automatic control. *Human Factors*, 54(5), 786-798.
- Navarro, J., François, M., & Mars, F. (soumis). Obstacle avoidance under automated steering: impact on driving and gaze behaviours. *Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour*.
- Navarro, J., Mars, F., Forzy, J.-F., El-Jaafari, M., & Hoc, J.-M. (2010). Objective and subjective evaluation of motor priming and warning systems applied to lateral control assistance. *Accident Analysis and Prevention*, 42(3), 904-912. <http://doi.org/10.1016/j.aap.2009.07.008>
- Navarro, J., Mars, F., & Hoc, J.-M. (2007). Lateral control assistance for car drivers: A comparison of motor priming and warning systems. *Human Factors*, 49(5), 950-960. <http://doi.org/10.1518/001872007X230280>
- Navarro, J., Mars, F., & Young, M. S. (2011). Lateral control assistance in car driving: classification, review and future prospects. *IET Intelligent Transport Systems*, 5(3), 207-220. <http://doi.org/10.1049/iet-its.2010.0087>
- Naveteur, J., Mars, F., & Crombez, G. (2005). The effect of eye orientation on slowly increasing pain. *European Journal of Pain*, 9(1), 79-85. <http://doi.org/10.1016/j.ejpain.2004.04.007>
- Newell, A. (1973). You can't play 20 questions with nature and win : projective comments on the papers of this symposium. *Computer Science Department*. Consulté à l'adresse <http://repository.cmu.edu/compsci/2033>
- Norman, D. A. (1988). *The Psychology of Everyday Things*. Basic Books.

- Norman, D., & Shallice, T. (1986). Attention to Action: Willed and Automatic Control of Behavior. In R. Davidson, R. Schwartz, & D. Shapiro (éd.), *Consciousness and Self-Regulation: Advances in Research and Theory IV*. Plenum Press.
- Nowak, D. A., Glasauer, S., & Hermsdörfer, J. (2013). Force control in object manipulation-A model for the study of sensorimotor control strategies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 37(8), 1578-1586. <http://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.06.003>
- O'Regan, J. K. (2011). *Why Red Doesn't Sound Like a Bell: Understanding the feel of consciousness* (1^{re} éd.). New York: OUP USA.
- Paillard, J. (1984). L'encodage sensorimoteur et cognitif de l'expérience spatiale. *Comportements*, (1), 217-225.
- Paillard, J. (1985). Les niveaux sensori-moteurs et cognitifs du contrôle de l'action. In *Recherches en Activités Physiques et Sportives* (p. 147-163). Marseille: Centre de Recherches de l'UEREPS, Université Aix-Marseille II.
- Paillard, J. (1991). Motor and representational framing of space. In J. Paillard (éd.), *Brain and space* (p. 163-182).
- Paillard, J. (1999). Body schema and body image – a double dissociation in deafferented patients. In G. N. Gantchev, S. Mori, & J. Massion (éd.), *Motor control: today and tomorrow*. Academic Publishing House: Sofia, Bulgaria.
- Paillard, J. (2005). Vectorial Versus Configural Encoding of Body Space - A neural basis for a distinction between Body schema and Body Image. In H. D. Preester & V. Knockaert (éd.), *Body Image and Body Schema: Interdisciplinary perspectives* (p. 62-89). John Benjamins Publishing Company.
- Paillard, J., Michel, F., & Stelmach, G. (1983). Localization without content. A tactile analogue of « blind sight ». *Archives of Neurology*, 40(9), 548-551.
- Panerai, F., Toffin, D., Paille, D., Kemeny, A., & Fadel, K. (2007). Eye movement patterns in nighttime driving: conventional and swivelling headlights. *Ingénieurs de l'automobile*, (786), 55-58.
- Parasuraman, R., & Manzey, D. H. (2010). Complacency and bias in human use of automation: an attentional integration. *Human Factors*, 52(3), 381-410.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 30(3), 286-297. <http://doi.org/10.1109/3468.844354>
- Peng, Y., & Boyle, L. N. (2015). Driver's adaptive glance behavior to in-vehicle information systems. *Accident Analysis and Prevention*, 85, 93-101. <http://doi.org/10.1016/j.aap.2015.08.002>
- Pezzulo, G., Barsalou, L. W., Cangelosi, A., Fischer, M. H., McRae, K., & Spivey, M. (2013). Computational Grounded Cognition: a new alliance between grounded cognition and computational modeling. *Frontiers in Psychology*, 3, 612. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00612>
- Pezzulo, G., & Castelfranchi, C. (2009). Thinking as the control of imagination: a conceptual framework for goal-directed systems. *Psychological Research*, 73(4), 559-577. <http://doi.org/10.1007/s00426-009-0237-z>
- Plöchl, M., & Edelmann, J. (2007). Driver models in automobile dynamics application. *Vehicle System Dynamics*, 45(7-8), 699-741. <http://doi.org/10.1080/00423110701432482>
- Prinz, W. (1997). Perception and Action Planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9(2), 129-154. <http://doi.org/10.1080/713752551>
- Ranney, T. A. (1994). Models of driving behavior: A review of their evolution. *Accident Analysis and Prevention*, 26(6), 733-750. [http://doi.org/10.1016/0001-4575\(94\)90051-5](http://doi.org/10.1016/0001-4575(94)90051-5)
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 13(3), 257-266. <http://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313160>
- Readinger, W. O., Chatziastros, A., Cunningham, D. W., Bulthoff, H. H., & Cutting, J. E. (2002). Gaze-

- eccentricity effects on road position and steering. *Journal of Experimental Psychology-Applied*, 8(4), 247-258. <http://doi.org/10.1037/1076-898X.8.4.247>
- Reina, G. A., & Schwartz, A. B. (2003). Eye-hand coupling during closed-loop drawing: Evidence of shared motor planning? *Human Movement Science*, 22(2), 137-152. [http://doi.org/10.1016/S0167-9457\(02\)00156-2](http://doi.org/10.1016/S0167-9457(02)00156-2)
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., & Berthoz, A. (2001). Role of lateral acceleration in curve driving: Driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator. *Human Factors*, 43(3), 483-495. <http://doi.org/10.1518/001872001775898188>
- Riggs, L. A., Ratliff, F., Cornsweet, J. C., & Cornsweet, T. N. (1953). The disappearance of steadily fixated visual test objects. *Journal of the Optical Society of America*, 43(6), 495-501.
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169-192. <http://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230>
- Rosch, E., Thompson, E., & Varela, F. J. (1992). *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. MIT Press.
- Rosenbaum, D. A., & Kornblum, S. (1982). A priming method for investigating the selection of motor responses. *Acta Psychologica*, 51(3), 223-243. [http://doi.org/10.1016/0001-6918\(82\)90036-1](http://doi.org/10.1016/0001-6918(82)90036-1)
- Sagberg, F., Fosser, S., & Saetermo, I. A. F. (1997). An investigation of behavioural adaptation to airbags and antilock brakes among taxi drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 29(3), 293-302. [http://doi.org/10.1016/S0001-4575\(96\)00083-8](http://doi.org/10.1016/S0001-4575(96)00083-8)
- Saleh, L., Chevrel, P., Claveau, F., Lafay, J.-F., & Mars, F. (2012). Contrôle latéral partagé d'un véhicule automobile : Conception à base d'un modèle cybernétique du conducteur et d'une commande H2 anticipative. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 46(4-5), 535-557.
- Saleh, L., Chevrel, P., Claveau, F., Lafay, J.-F., & Mars, F. (2013). Shared Steering Control Between a Driver and an Automation: Stability in the Presence of Driver Behavior Uncertainty. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(2), 974-983. <http://doi.org/10.1109/TITS.2013.2248363>
- Saleh, L., Chevrel, P., Mars, F., Lafay, J.-F., & Claveau, F. (2011). Human-like cybernetic driver model for lane keeping. In S. Bittanti, A. Cenedese, & S. Zampieri (éd.), *Proceedings of the 18th IFAC World Congress* (p. 4368-4373).
- Salvucci, D. D. (2006). Modeling driver behavior in a cognitive architecture. *Human Factors*, 48(2), 362-380.
- Salvucci, D. D., & Gray, R. (2004). A two-point visual control model of steering. *Perception*, 33(10), 1233-1248. <http://doi.org/10.1068/p5343>
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84, 1-66. <http://doi.org/10.1037/0033-295X.84.1.1>
- Sentouh, C., Chevrel, P., Mars, F., & Claveau, F. (2009). A human-centred Approach of Steering Control Modelling. In *21st IAVSD Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks* (p. 12 pp). Stockholm, Sweden.
- Sentouh, C., Chevrel, P., Mars, F., & Claveau, F. (2009). A Sensorimotor Driver Model for Steering Control. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (p. 2462-2467).
- Sheridan, T. B. (2011). Adaptive Automation, Level of Automation, Allocation Authority, Supervisory Control, and Adaptive Control: Distinctions and Modes of Adaptation. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 41(4), 662-667. <http://doi.org/10.1109/TSMCA.2010.2093888>
- Sheridan, T. B., & Verplank, W. L. (1978). *Human and Computer Control of Undersea Teleoperators*. Cambridge, MA: MIT Man-Machine Systems Laboratory.
- Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor theory. *Psychological Bulletin*, 136(6), 943-974. <http://doi.org/10.1037/a0020541>
- Siegler, I., Reymond, G., Kemeny, A., & Berthoz, A. (2001). Sensorimotor integration in a driving simulator:

- contributions of motion cueing in elementary driving tasks. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2001* (p. 21-32).
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: is it indeed 90% visual? *Perception*, 25(9), 1081-1089.
- Smith, M. A., Ghazizadeh, A., & Shadmehr, R. (2006). Interacting Adaptive Processes with Different Timescales Underlie Short-Term Motor Learning. *PLoS Biology*, 4(6), e179. <http://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040179>
- Steen, J., Damveld, H. J., Happee, R., Van Paassen, M. M., & Mulder, M. (2011). A review of visual driver models for system identification purposes. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (p. 2093-2100). <http://doi.org/10.1109/ICSMC.2011.6083981>
- Steinbach, M. J. (1969). Eye tracking of self-moved targets: the role of efference. *Journal of Experimental Psychology*, 82(2), 366-376.
- Summala, H., Nieminen, T., & Punto, M. (1996). Maintaining lane position with peripheral vision during in-vehicle tasks. *Human Factors*, 38(3), 442-451. <http://doi.org/10.1518/001872096778701944>
- Suzuki, K., & Jansson, H. (2003). An analysis of driver's steering behaviour during auditory or haptic warnings for the designing of lane departure warning system. *Isae Review*, 24(1), 65-70. [http://doi.org/10.1016/S0389-4304\(02\)00247-3](http://doi.org/10.1016/S0389-4304(02)00247-3)
- Talsma, D., Senkowski, D., Soto-Faraco, S., & Woldorff, M. G. (2010). The multifaceted interplay between attention and multisensory integration. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(9), 400-410. <http://doi.org/10.1016/j.tics.2010.06.008>
- Thorpe, S., Fize, D., & Marlot, C. (1996). Speed of processing in the human visual system. *Nature*, 381(6582), 520-522. <http://doi.org/10.1038/381520a0>
- Tijerina, L., Ho, A., Cummings, M. L., Kochhar, D. S., & Wang, E. (2006). Integrating Intelligent Driver Warning Systems: Effects of Multiple Alarms and Distraction on Driver Performance. Présenté à Transportation Research Board 85th Annual Meeting.
- Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., & Droulez, J. (2007). Role of steering wheel feedback on driver performance: driving simulator and modeling analysis. *Vehicle System Dynamics*, 45(4), 375-388. <http://doi.org/10.1080/00423110601058874>
- Tse, P. U., Intriligator, J., Rivest, J., & Cavanagh, P. (2004). Attention and the subjective expansion of time. *Perception & Psychophysics*, 66(7), 1171-1189. <http://doi.org/10.3758/BF03196844>
- Tsoi, K. K., Mulder, M., Abbink, D., & others. (2010). Balancing safety and support: Changing lanes with a haptic lane-keeping support system. In *2010 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC)*, (p. 1236-1243).
- Tulving, E. (1985). How many memory systems are there? *American Psychologist*, 40(4), 385-398. <http://doi.org/10.1037/0003-066X.40.4.385>
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two Cortical Visual Systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (éd.), *Analysis of Visual Behavior* (p. 549-586). Cambridge, MA: The MIT Press.
- VanRullen, R., & Thorpe, S. J. (2002). Surfing a spike wave down the ventral stream. *Vision Research*, 42(23), 2593-2615.
- VanWinsum, W., & Godthelp, H. (1996). Speed choice and steering behavior in curve driving. *Human Factors*, 38(3), 434-441. <http://doi.org/10.1518/001872096778701926>
- Vercher, J., & Gauthier, G. (1988). Cerebellar Involvement in the Coordination Control of the Oculo-Manual Tracking System - Effects of Cerebellar Dentate Nucleus Lesion. *Experimental Brain Research*, 73(1), 155-166. <http://doi.org/10.1007/BF00279669>
- Vercher, J. L., Lazzari, S., & Gauthier, G. (1997). Manuo-ocular coordination in target tracking .2. Comparing the model with human behavior. *Biological Cybernetics*, 77(4), 267-275. <http://doi.org/10.1007/s004220050387>
- Wallis, G., Chatziastros, A., & Bühlhoff, H. (2002). An unexpected role for visual feedback in vehicle steering

control. *Current Biology*, 12(4), 295-299.

Wann, J., & Land, M. (2000). Steering with or without the flow: is the retrieval of heading necessary? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(8), 319-324. [http://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01513-8](http://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01513-8)

Wann, J. P., & Swapp, D. K. (2000). Why you should look where you are going. *Nature Neuroscience*, 3(7), 647-648. <http://doi.org/10.1038/76602>

Ward, N. J., Alexander, L., Cheng, P.-M., Gorjestani, A., Newstrom, B., Olson, C., ... Donath, M. (2004). A Demonstration of a Vision Enhancement System for State Patrol Vehicles. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 8(3), 169-185.

Ward, N. J., Parkes, A., & Crone, P. R. (1995). Effect of background scene complexity and field dependence on the legibility of head-up displays for automotive applications. *Human Factors*, 37(4), 735-745.

Warren, W. H., & Fajen, B. R. (2004). Optic flow and beyond. In L. M. Vaina, S. A. Beardsley, & S. K. Rushton (éd.), *Optic Flow and Beyond* (p. 307-337). Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers.

Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 159-177.

Wickens, C. D., & Gosney, J. L. (2003). *Redundancy, Modality, Priority and Instructions in Dual Task Interference Between Simulated Vehicle Control and In-Vehicle Technology* (Technical Report No. AHFD-03-18/ GM-03-3). Savoy, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign, Aviation Research Lab.

Wierwille, W., Casali, J., & Repa, B. (1983). Driver Steering Reaction-Time to Abrupt-Onset Crosswinds, as Measured in a Moving-Base Driving Simulator. *Human Factors*, 25(1), 103-116.

Wilkie, R. M., Kountouriotis, G. K., Merat, N., & Wann, J. P. (2010). Using vision to control locomotion: looking where you want to go. *Experimental Brain Research*, 204(4), 539-547. <http://doi.org/10.1007/s00221-010-2321-4>

Wilkie, R. M., & Wann, J. P. (2003). Eye-movements aid the control of locomotion. *Journal of Vision*, 3(11), 677-684. <http://doi.org/10.1167/3.11.3>

Wilkie, R. M., Wann, J. P., & Allison, R. S. (2008). Active gaze, visual look-ahead, and locomotor control. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 34(5), 1150-1164. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.34.5.1150>

Wilson, A. D., & Golonka, S. (2013). Embodied cognition is not what you think it is. *Cognitive Science*, 4, 58. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00058>

Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625-636.

Wolpert, D. M., Diedrichsen, J., & Flanagan, J. R. (2011). Principles of sensorimotor learning. *Nature Reviews Neuroscience*, 12(12), 739-751. <http://doi.org/10.1038/nrn3112>

Wolpert, D. M., Doya, K., & Kawato, M. (2003). A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 358(1431), 593-602. <http://doi.org/10.1098/rstb.2002.1238>

Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2010). Motor learning. *Current Biology*, 20(11), R467-R472. <http://doi.org/10.1016/j.cub.2010.04.035>

Young, K. L., & Regan, M. A. (2007). Use of manual speed alerting and cruise control devices by car drivers. *Safety Science*, 45(4), 473-485. <http://doi.org/10.1016/j.ssci.2006.08.002>

Young, M. S., Stanton, N. A., & Harris, D. (2007). Driving automation: learning from aviation about design philosophies. *International Journal of Vehicle Design*, 45(3), 323-338. <http://doi.org/10.1504/IJVD.2007.014908>

Yuille, A., & Kersten, D. (2006). Vision as Bayesian inference: analysis by synthesis? *Trends in Cognitive Sciences*, 10(7), 301-308. <http://doi.org/10.1016/j.tics.2006.05.002>