

Modélisation de l'adaptation des conducteurs au comportement du véhicule et expérimentations sur simulateur

Renaud Deborne

▶ **To cite this version:**

Renaud Deborne. Modélisation de l'adaptation des conducteurs au comportement du véhicule et expérimentations sur simulateur. Mathématiques générales [math.GM]. Ecole Centrale Paris, 2009. Français. NNT : 2009ECAP0019 . tel-00453301

HAL Id: tel-00453301
https://theses.hal.science/tel-00453301

Submitted on 4 Feb 2010

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.



ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES « ÉCOLE CENTRALE PARIS »

THÈSE

Présentée par

Renaud DEBORNE

Pour l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : Mathématiques Appliquées

Laboratoire d'accueil : Mathématiques Appliquées aux Systèmes

Sujet : Modélisation de l'adaptation des conducteurs au comportement du véhicule et expérimentations sur simulateur

Soutenue le 19 juin 2009

Devant un jury composé de :

Dr. Cournède Paul-Henry	**Président**
Pr. Merienne Frédéric	**Rapporteur**
Pr. Mestre Daniel	**Rapporteur**
Dr. Kemeny Andras	**Co-directeur de thèse**
Dr. Saguez Christian	**Co-directeur de thèse**
Dr. Reymond Gilles	**Examinateur**

2009 -ECAP0019

A mon oncle Hubert

Remerciements

A mes directeurs de thèse

Je remercie Andras Kemeny de m'avoir accueilli au Centre Technique de Simulation de Renault et de m'avoir offert l'opportunité de travailler sur des domaines ainsi riches que diversifiés mais également d'être associé à une équipe performante, développant des outils exceptionnels. Je remercie Christian Saguez de m'avoir accueilli au sein de son Laboratoire de Mathématiques Appliquées aux Systèmes de l'Ecole Centrale Paris.

Aux membres du jury

Je remercie Gilles Reymond de m'avoir guidé tout au long de ces quelques années. La pertinence de ses remarques et de ses conseils ainsi que sa disponibilité m'ont permis de mener à bien mes recherches. Je remercie Paul-Henry Cournède d'avoir suivi mon travail, de m'avoir prodigué de précieux conseils et d'avoir su m'encourager. Pour cela je lui suis sincèrement reconnaissant. Je remercie messieurs Frédéric Mérienne et Daniel Mestre pour avoir eu l'amabilité d'accepter d'être les rapporteurs de mon travail de thèse.

A mes collègues, passés et présents

Je remercie Olivier Pape, Wisama Khalil, Matjaz Colnaric, Bojan Hadjar, Rok Ostrovrsnik, Domen Verber, Matej Sprogar, Roman Gumzej et Stanko Moraus pour m'avoir initié et donné goût à la Recherche, qu'elle soit universitaire ou industrielle. Je remercie Erwin Boer pour les différents échanges que nous avons pu avoir sur mon travail et l'intérêt qu'il a porté à celui-ci. Je remercie Sylvie Dervin, Catherine Lhôpital et Géraldine Carbonelle pour leur sympathie, leurs encouragements et leur incroyable efficacité dans l'aide qu'elles m'ont apporté pour la gestion des différents aspects administratifs de mon travail. Je remercie Jean-Christophe Collinet pour avoir su faire preuve d'autant de compréhension, de flexibilité et surtout d'empathie pour que je puisse mener

à son terme mon travail de thèse tout en combinant mon activité au sein de son équipe. Je remercie mes différents collègues du Centre Technique de Simulation de Renault et de l'Ecole Centrale Paris. Merci à Agnès, Arnaud qui a eu la patience de relire mon travail, Benjamin, Benoît, Christian, Damien, Emilie, Frédéric, Gilles, Hakim, Jean-Charles, Serge, Stéphanie, Stéphanie, Manuel, Matthieu, Mehmet, Mohammed, Olivier, Philippe, Slim, Sophie, Thierry, Thomas, Maxime, Mamy, Anne et mes stagiaires Adrien et Emmanuel pour m'avoir accompagné tout au long de ces années et des liens que nous avons pu tisser. Je tiens aussi à remercier mes deux *codétenus* de vignette, Emmanuelle Combe et Nicolas Filliard, pour nos nombreux échanges aussi bien d'ordre scientifique qu'existentiel mais aussi pour leur soutien, je leur témoigne mon amitié la plus sincère.

A mes amis

Merci en particulier à Alain, Arnaud, Cédric, Cahuète, Florian, Julien, le trio angevin (Frédéric, Romain, Sébastien), Ludovic, Onur, Nell, Pascal, Paul, Sylvie, Sylvie et Samuel ainsi que ceux que j'aurai pu oublié. Merci sincèrement à l'enseigne de vaisseau deuxième classe David. Merci infiniment à Elisabeth dont je ne mesure pas encore tous les bienfaits qu'elle m'a apportés. Je remercie évidement les *vétos*, pour leur amitié, leur patience et la fraîcheur qu'ils ont su m'apporter, merci encore à Béatrice et Damien, Caroline et Bilou, Dana, Elodie et Olivier, Moon qui finira sa thèse j'en suis sûr et Ludovic, Sarah et Sylvain. Merci aux anciens de *Stan*, Benjamin pour nos nombreuses réflexions et pour son écoute, Coucoul et Nathalie, Julien et Céline, Pouf et Aurélie et ma *petite sœur* Florence. Je remercie Arnaud Andrieux pour son amitié indéfectible qu'il me témoigne depuis bientôt treize ans, pour ses encouragements durant les moments difficiles, pour avoir finalement toujours su être là. Merci aussi à Marie-Emilie.

A ma famille

Je remercie enfin mes parents, Francine et Olivier, mon frère Benoît, Séverine, mes grands-parents, Paulette et Yvon pour m'avoir accompagné, guidé et encouragé dans mes choix tout au long de ces années. Je les aime profondément. Mes pensées vont aussi à Marie et André que je n'ai malheureusement pas ou trop peu connu.

Résumé

Lorsqu'un conducteur prend en main un nouveau véhicule, celui-ci risque de présenter un comportement routier différent. Pour autant cela ne nécessite pas d'apprentissage particulier de la part du conducteur et il sera très rapidement capable de maîtriser ce véhicule. Cet acte anodin révèle une capacité propre aux systèmes biologiques qui s'étend pour l'être humain, bien au-delà du champ spécifique de la conduite automobile. En effet, nous sommes dans nos gestes quotidiens confrontés continuellement à un environnement changeant. Nos capacités d'apprendre confèrent à nos connaissances sur le monde et sur notre interaction avec celui-ci une plasticité qui se révèle essentielle. Mais ces capacités ne sont pas infinies et la détermination de leurs limites présente un réel défi pour les constructeurs automobiles qui proposent de plus en plus fréquemment des systèmes embarqués pouvant modifier le comportement dynamique du véhicule. Par ailleurs, l'étude de l'adaptation d'un conducteur à un comportement imprévisible du véhicule ou d'un de ses systèmes d'aide à la conduite peut se révéler complexe à mettre en place, coûteuse en instrumentation voire dangereuse. L'avènement des outils de simulation et de réalité virtuelle permet aujourd'hui de contourner certaines de ces limitations. Toutefois, la conduite d'expérimentations exhaustives quant aux types d'évènements possibles avec un nombre de sujets suffisamment important pour être pertinent en regard de la diversité des profils de conducteurs est impossible. L'utilisation de modèles de comportement du conducteur est donc nécessaire. Cependant de tels modèles dotés de de capacités adaptatives sont encore trop peu nombreux.

De ce constat nous nous proposons dans cette étude d'établir un modèle de conducteur ayant la propriété de pouvoir intégrer des modifications de l'environnement. Plusieurs hypothèses existent sur la manière dont le système nerveux central peut réagir à de tels évènements. Nous identifions en particulier la stratégie de mise à jour de modèle interne et celle de modulation de l'impédance des membres. Nous intégrons au sein de notre modèle ces deux stratégies afin de lui conférer une certaine cohérence physiologique mais aussi pour en étudier les performances propres. Nous proposons alors une méthodologie pour l'étude

de l'adaptation sensorimotrice des conducteurs que nous appliquons au cas de la conduite en virage. Nous établissons ainsi un nouveau modèle adaptatif de la tâche de conduite pour le contrôle latéral. Nous proposons également une calibration des différents paramètres de ce modèle. Nous réalisons alors deux expérimentations mettant en lumière les capacités d'adaptation des conducteurs. Puis, nous montrons de quelle manière notre modèle permet d'apporter des éléments de réponse sur les mécanismes responsables de cette adaptation. Enfin nous suggérons une application de aux études de sûreté de fonctionnement.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'une thèse Cifre (contrat ANRT n°2005/620) entre la Direction des Méthodes d'Ingénierie de Renault, au sein du Centre Technique de Simulation (CTS) et du Laboratoire Mathématiques Appliquées aux Systèmes (MAS) EA 4037, Ecole Centrale Paris, sous la co-direction de MM. Christian Saguez (ECP) et Andras Kemeny (Renault).

Mots clés : Réalité Virtuelle, Contrôle Sensorimoteur, Contrôle Adaptatif, Simulation de conduite, Sûreté de Fonctionnement, Modèle Interne, Modulation d'Impédance, Modélisation Conducteur, Adaptation.

Abstract

Whenever a driver takes over a new vehicle, he is likely to experience a different road behavior of the car. However, this does not require any special training for the driver as he will be very prompt in controlling his vehicle. This usual action is evidencing a genuine capability which is specific to biological systems and, for any human being, is expanding far beyond the particular application of automobile drive. As a matter of fact, we are constantly facing a changing environment in our daily motions. Our learning capabilities generate a unique adaptability which is key to our understanding of the world as well as our interaction with it. However, these capabilities are not infinite and their limit fixing constitutes a true challenge for car manufacturers who are more and more often offering embedded systems capable of modifying the dynamic behavior of the vehicle. Moreover, the survey on driver's adaptability to an unpredictable behavior of either the vehicle or its drive aided systems may turn out to be complex to implement, cost prohibitive in instrumentation or even hazardous. Today, the introduction of simulation and virtual reality tools allows to get rid of some of these limitations. However, the conduct of exhaustive experiments proves to be impossible considering the nature of possible events involving a large number of drivers to be meaningful and their inherent profile diversity. Utilization of driver behavior models becomes therefore an absolute necessary. It is worth notice that such models featured with adaptive capabilities are still far too few.

Consequently, we are proposing in this survey to set up a driver model with the capability of integrating environmental changes. There are several hypotheses to explore as to the way the central nervous system is responding to such events. More specifically, we are analyzing the updating strategy of internal models and impedance modulation. Both strategies are being integrated into our model so as to make it more coherent physiologically and permit further evaluation of its inherent performances. Moreover, we are formulating a methodology for the study of sensorimotor driver's adaptability which we are using for turn driving application. In this way, we are setting up a new adap-

tive driving task model for lateral side application. We are also proposing this model with a calibration of its various parameters. Then, we are achieving two experiments evidencing adaptive driver's capabilities. As a next step, we are demonstrating how our model helps understanding this adaptation. Finally, we are developing a possible application to the in-operation safety surveys.

This work was performed within the framework of an ANRT grant (n°2005/620) in Renault Technical Center for Simulation (CTS) and in the Laboratoire de Mathématiques Appliquées aux Systèmes (MAS) EA 4037, Ecole Centrale Paris. This work was supervised by Dr. Christian Saguez (ECP) and Dr. Andras Kemeny(Renault).

Keywords : Virtual Reality, Sensorimotor Control, Adaptive Control, Driving Simulation, Safety Reliability, Internal Model, Impedance Modulation, Driver Modelling, Adaptation.

Table des matières

1 Introduction **1**

I Revue bibliographique **7**

2 La modélisation conducteur **9**
2.1 Introduction 10
2.2 Une approche holistique 10
2.3 Le contrôle longitudinal du véhicule 13
2.3.1 Contrôle en suivi de véhicule 13
2.3.2 Performances et synthèse 17
2.4 Le contrôle latéral du véhicule 21
2.4.1 Les modèles quasi linéaires 23
2.4.2 Les modèles optimaux 23
2.4.3 Caractéristiques biomécaniques 24
2.4.4 Performances et synthèse 28
2.5 Conclusion 30

3 Percevoir et agir : physiologie **31**
3.1 Introduction 32
3.2 Le système nerveux central 32
3.3 Percevoir 34
3.3.1 Le système visuel 34
3.3.2 Le système vestibulaire 36
3.3.3 Le système proprioceptif 38
3.4 Agir 40
3.4.1 Anatomie et fonctionnement des muscles 40
3.4.2 Modélisation 42
3.4.3 Propriétés 43
3.4.4 Comportement 44
3.4.5 Ordres de grandeur 47
3.5 Contraintes 47

3.5.1 Redondances géométriques 47
3.5.2 Redondances cinématiques 48
3.5.3 Redondances dynamiques 49
3.6 Invariants du mouvement 49
3.6.1 Loi de Fitt 49
3.6.2 Loi de la puissance deux tiers 50
3.7 Conclusion 50

4 Les théories du contrôle sensorimoteur 51
4.1 Introduction 52
4.2 Les théories du point d'équilibre 52
4.2.1 Contrôle du point d'équilibre en boucle fermée 53
4.2.2 Contrôle du point d'équilibre en boucle ouverte 55
4.2.3 Un modèle synthétique 55
4.3 Les théories du contrôle optimal 56
4.3.1 Critère de la secousse minimale 57
4.3.2 Critère de la variation minimale de couple articulaire . . 57
4.3.3 Critère de la variance minimale 58
4.4 La théorie des modèles internes 60
4.4.1 Différents types de modèles internes 60
4.4.2 Différentes utilisations des modèles internes 62
4.4.3 Existence 65
4.5 Conclusion 66

5 L'adaptation sensorimotrice 67
5.1 Introduction 68
5.2 Les stratégies d'adaptation 68
5.2.1 Adaptation par modulation d'impédance 68
5.2.2 Adaptation par les modèles internes 69
5.2.3 Combinaison de stratégies 73
5.3 Adaptation au contrôle de systèmes 73
5.4 Les informations nécessaires à l'adaptation 75
5.5 Optimisation de l'adaptation 76
5.6 Conclusion 76

6 Le contrôle adaptatif 79
6.1 Introduction 80
6.2 Schémas classiques 80
6.2.1 Gain Scheduling 81
6.2.2 Multi Model Adaptive Control 82
6.2.3 High Gain Adaptive Control 83
6.2.4 Model Reference Adaptive Control 85

6.2.5 Feedback Error Learning 86
6.2.6 Adaptive Sliding Control 88
6.3 Caractéristiques 90
6.3.1 Performances 90
6.3.2 Analogies avec le contrôle sensorimoteur 91
6.4 Conclusion 93

II Modélisation et expérimentations 95

7 Méthodologie 97
7.1 Introduction 98
7.2 Méthodologie 98
7.2.1 Impact 98
7.2.2 Détection 100
7.2.3 Interprétation 100
7.2.4 Réaction 101
7.2.5 Performance 103
7.3 Application 103
7.3.1 Stratégies adaptatives 103
7.3.2 Contexte de l'étude 104
7.4 Conclusion 105

8 Modèle adaptatif de conducteur 107
8.1 Introduction 108
8.2 Contexte et hypothèses 108
8.3 Implémentation 110
8.3.1 Anticipation-prédiction 110
8.3.2 Système neuromusculaire 113
8.4 Composants adaptatifs 116
8.4.1 Mise à jour de modèle interne 116
8.4.2 Modulation d'impédance 119
8.5 Tests préliminaires 123
8.6 Conclusion 128

9 Calibration 129
9.1 Introduction 130
9.2 Expérimentation 130
9.2.1 Matériels et méthodes 130
9.3 Résultats et discussion 133
9.3.1 Modèle de la dynamique latérale du véhicule 134
9.3.2 Modèle du système volant 135

9.3.3 Impédance apparente 136
9.3.4 Performance de conduite 139
9.4 Conclusion 146

10 Expérimentations **149**
10.1 Introduction 150
10.2 Contexte simplifié 150
10.2.1 Matériels et méthodes 150
10.2.2 Résultats et discussion 154
10.3 Contexte automobile 159
10.3.1 Matériels et méthodes 160
10.3.2 Résultats et discussion 164
10.4 Conclusion 173

11 Perspectives et conclusion générale **175**
11.1 Perspectives 176
11.1.1 Evolutions du modèle 176
11.1.2 Sûreté de fonctionnement 179
11.2 Conclusion générale 182

Bibliographie **183**

III Annexes **199**

A Stabilité des systèmes dynamiques **201**
A.1 Stabilité de systèmes asservis 201
A.1.1 Définitions 201
A.1.2 Méthodes 201
A.2 Stabilité au sens de Lyapunov 203
A.2.1 Définitions 203
A.2.2 Théorème de stabilité 204
A.2.3 Cas LTI 204

B Indicateurs de conduite **205**
B.1 Introduction 205
B.2 Contrôle longitudinal 205
B.2.1 Indicateurs basés sur la pédale d'accélération 206
B.2.2 Indicateurs basés sur la pédale de frein 206
B.2.3 Indicateurs basés sur la vitesse, l'accélération du véhicule 207
B.2.4 Indicateurs spécifiques au suivi de véhicule 207
B.3 Contrôle latéral 208
B.3.1 Indicateurs basés sur le volant 209

B.3.2 Indicateurs basés sur la position, la vitesse et l'accélération du véhicule 213
B.4 Conclusion 215

C Communications **217**

Chapitre 1

Introduction

Introduction générale

La diversité du parc automobile a pour conséquence directe que lorsqu'un conducteur change de véhicule pour quelque raison que ce soit, celui-ci risque de présenter un comportement routier différent. Mais cela ne nécessite pas d'apprentissage particulier et très rapidement le conducteur aura son nouveau véhicule en main. Cet acte anodin révèle une capacité propre aux systèmes biologiques qui s'étend pour l'être humain, bien au-delà du champ spécifique de la conduite automobile. En effet, nous sommes dans nos gestes quotidiens confrontés continuellement à un environnement changeant. Il ne s'agit pas seulement de ce qui nous est extérieur comme les objets que nous sommes amenés à manipulés car notre corps lui-même change, notre croissance modifie la taille, la masse de notre corps, les performances de nos muscles mais aussi de nos organes sensoriels comme en particulier la vue. Nos capacités d'apprendre confèrent à nos connaissances sur le monde et sur notre interaction avec celui-ci une plasticité qui se révèle essentielle.

Toutefois notre capacité d'adaptation n'est pas infinie et la détermination de ses limites présente un réel défi pour les constructeurs automobiles. Ces derniers proposent en effet des équipements pouvant modifier le comportement perçu du véhicule. Le cas de l'ABS est particulièrement représentatif de la mauvaise interprétation qu'un conducteur peut avoir du comportement du système lui portant assistance. Les retours d'expériences ont révélés que surpris par les effets causés par l'action de ces systèmes certains conducteurs crurent à un dysfonctionnement et relâchèrent la pression qu'ils appliquaient sur la pédale de frein au lieu de la maintenir. Cet exemple est extrême car l'action du conducteur dans ce cas précis a pour effet de contre-carrer la fonction pour laquelle

le système a été développé. Mais il s'avère toutefois révélateur et d'autant plus nécessaire à anticiper avec la tendance actuelle d'intégration dans les véhicules de systèmes d'aides dont la sophistication est croissante. Mais la modification de la dynamique d'un véhicule peut également provenir de défaillance de ces systèmes d'aides (dont les modes de fonctionnement dégradés sont de plus en plus nombreux) ou même d'organes mécaniques classiques.

Les mécanismes à l'origine de notre aptitude à nous adapter sont complexes et encore partiellement établis. Toutefois de nombreux résultats expérimentaux ont permis de révéler certaines propriétés relatives aux solutions mises en place par le système nerveux central pour faire face à l'inattendu. En particulier des stratégies de natures différentes semblent avoir été mises en lumière mais la manière dont celles-ci sont mises en œuvre et exploitées est encore peu connue. Que ce soit en internalisant les changements de l'environnement dans l'optique de les anticiper au mieux ou bien en modulant l'impédance de nos membres pour que nos mouvements soient le moins possible perturbés, ces stratégies autorisent dans bien des cas une adaptation rapide voir quasi immédiate aux nouveaux contextes qui se présentent. Mais cette rapidité apparente dans la réalisation de tâches avec un niveau de performance suffisant peut dissimuler des processus dont la dynamique peut être beaucoup plus longue.

Les caractéristiques des mécanismes adaptifs sont partiellement accessibles par l'intermédiaire de métriques adéquates. Ainsi dans le contexte de la conduite, nous disposons de nombreux critères permettant de quantifier la performance de contrôle d'un conducteur et donc les éventuelles évolutions de celle-ci. Mais dans leur majorité ils informent principalement sur le résultat global de l'action de ces mécanismes et ne fournissent d'informations qu'à posteriori. L'enjeu est alors double. Tout d'abord la compréhension plus fine de l'implication des processus adaptatifs dans la tâche de conduite ainsi que l'estimation de certaines de leurs caractéristiques propres autoriserait une meilleure évaluation de leur performances selon les contextes considérés. Par ailleurs, l'observation et la mesure de l'adaptation d'un conducteur à un certain évènement imprévisible peut se révéler complexe à mettre en place, coûteux en instrumentation voire même dangereux. Le recours à des pilotes experts pour des essais réels est alors recommandé, biaisant toutefois la représentativité des résultats vis-à-vis d'une population de conducteurs lambda. L'avènement des outils de simulation et de réalité virtuelle permet de contourner certaines de ces limitations. Toutefois, la conduite d'expérimentations exhaustives quant aux types d'évènements possibles avec un nombre de sujets suffisamment important pour être pertinent en regard de la diversité des profils de conducteurs est impossible.

Le recours à des outils prédictifs tels que des modèles de comportement conducteur est alors tout indiqué. Si tant est que leur représentativité est validée, ils autorisent à tester rapidement, à faible coût un grand nombre de contextes et de profils type de conducteurs. En intégrant les principes de fonctionnement des différents mécanismes adaptatifs, ils permettent alors de mieux comprendre, de discriminer leur implication dans la réalisation de la tâche de conduite. En estimant leurs caractéristiques propres, il est alors possible d'évaluer les effets de certains évènements en figeant le type de stratégie mise en place par le système nerveux central pour faire face à l'imprévu. De tels outils apportent une réelle aide à la décision dans le cadre d'études d'ordre sécuritaire voire en amont de la conception de systèmes d'assistance. Ils autorisent en particulier une première estimation des résultats d'expérimentations pouvant par exemple influencer la conception même du protocole de ces dernières.

Plan de lecture

Le premier chapitre de la partie recherches bibliographiques sera consacré à un état de l'art de la modélisation conducteur. De par la complexité de la tâche de conduite et de la multitude de processus impliqués, nous nous restreindrons à l'aspect pilotage (Neboît, 1974, Michon, 1985) de la conduite, c'est-à-dire à la manière dont sont exécutées les manœuvres que le conducteur désire réaliser. Nous souhaitons ainsi comprendre comment un conducteur manipule les interfaces de son véhicule (pédales, volant,...) pour obtenir le comportement désiré de celui-ci (vitesse, position sur la voie,...). Nous conservons à l'esprit que notre problématique concerne le comportement des conducteurs face à un environnement changeant et nous verrons alors comment les différentes approches de modélisations existantes permettent d'y répondre. Nous arriverons en particulier au constat que l'interaction entre le conducteur et le véhicule n'est pas ou peu explicitement décrite et qu'il nous sera alors nécessaire de mieux comprendre les spécificités des conducteurs pour en apprécier au mieux ses performances.

Cela fera l'objet des trois chapitres suivants. Ainsi nous présenterons une description succincte des différents récepteurs sensoriels et des actionneurs qui composent chaque individu. Nous insisterons en particulier sur certaines limitations physiologiques qui nous paraissent pertinentes dans leur impact sur la tâche de conduite. Cela nous conduira à nous poser différentes questions sur la manière dont le système nerveux central gère ces différentes contraintes : multitude d'afférences sensorielles, extraction d'informations au sein de signaux bruités et retardés, choix des commandes motrices.

Cela nous amènera à présenter au chapitre quatre les principales théories du contrôle moteur, qui décrivent l'interaction entre un individu, son environnement et la tâche qu'il désire accomplir. Nous verrons alors l'approche "perception-action", les théories du point d'équilibre, du contrôle optimale et enfin celle des modèles internes. Bien que chacune d'entre elles présentent soit compatible avec des observations expérimentales, nous identifierons celle qui nous semblera la plus adaptée à la description de la tâche de conduite dans notre contexte.

Nous présenterons enfin au chapitre cinq quelques résultats classiques mettant en évidence la plasticité du contrôle sensorimoteur ainsi que les performances des processus d'adaptation. Nous rappellerons les différentes stratégies pouvant décrire ces observations. Nous nous attarderons sur la modulation d'impédance musculaire et la mise à jour de modèles internes. Nous apporterons des éléments de réponses concernant la manière dont ces différentes stratégies peuvent êtres mises en œuvre. De retour à notre problématique, il nous apparaîtra alors nécessaire d'intégrer ces différentes stratégies pour à la fois mieux comprendre les comportements observés expérimentalement mais aussi discriminer les stratégies pouvant être employées dans notre contexte.

La mise en œuvre de ces stratégies au sein d'un modèle mathématique de conducteur nécessitera de disposer d'outils dont l'inspiration sera issue de la théorie de la commande adaptative. Nous présenterons alors différentes approches pour la conception de tels contrôleurs, présentant par ailleurs certaines similitudes avec les observations expérimentales de la plasticité du contrôle moteur.

En regard des diverses informations collectées lors des recherches bibliographiques, nous proposerons au chapitre sept de reformuler notre problématique posée initialement. Au delà d'introduire un nouveau modèle de conducteur doté de capacités adaptatives, nous proposerons dans un premier temps une approche globale et générique, une méthodologie visant à encadrer l'étude du comportement adaptatif des conducteurs. Nous présenterons alors différents points d'intérêts que nous jugerons essentiels pour répondre à notre problématique. Puis dans une seconde partie, nous nous concentrerons sur la redéfinition de notre contexte de travail.

Nous proposerons au cours du chapitre huit un nouveau modèle de comportement conducteur pour la tâche de contrôle latéral du véhicule. Ce modèle sera adaptatif dans le sens où il sera muni de capacités de réactions actives à des modifications du contexte de la tâche pour lequel il est initialement développé.

Nous présenterons alors les hypothèses principales sur lesquelles se fonde notre approche puis nous détaillerons au lecteur la formalisation même du modèle.

Malgré la simplicité apparente de la tâche de conduite considérée, nous nous apercevrons qu'un grand nombre d'hypothèses auront été posées afin de réduire la complexité du système global étudié. En particulier certains paramètres définissant le modèle devront faire l'objet d'une calibration spécifique dans le sens où littérature ne nous permettra pas d'en déterminer les valeurs. Cela fera l'objet du chapitre neuf où une expérimentation spécifique sera réalisée dans l'objectif de déterminer des gammes de valeurs de ces paramètres et de s'assurer qualitativement de la cohérence des prédictions du modèle avec les observations expérimentales.

Puis nous présenterons dans le chapitre dix deux expérimentations ayant pour objectif de mettre en lumière le caractère adaptatif des conducteurs. Ces expérimentations reposeront sur des tâches similaires, de poursuite visuo-manuelle. La première expérimentation se placera dans un contexte simplifié tandis que celui de la seconde sera plus écologique à la conduite. Nous remarquerons en particulier que la quantification de ces capacités d'adaptation par des métriques classiques et la compréhension des mécanismes mis en jeu qui en découle sera limitée. Nous verrons alors quels pourront être les apports de notre modèle de conducteur pour de telles études.

Enfin, avant de proposer une conclusion générale à notre travail de recherche, nous proposerons quelques pistes de réflexion et d'évolution de notre modèle de conducteur et suggérerons une application industrielle au travers des études de sûreté de fonctionnement.

Première partie

Revue bibliographique

Chapitre 2

La modélisation conducteur

Sommaire

2.1 Introduction 10
2.2 Une approche holistique 10
2.3 Le contrôle longitudinal du véhicule 13
2.3.1 Contrôle en suivi de véhicule 13
2.3.2 Performances et synthèse 17
2.4 Le contrôle latéral du véhicule 21
2.4.1 Les modèles quasi linéaires 23
2.4.2 Les modèles optimaux 23
2.4.3 Caractéristiques biomécaniques 24
2.4.4 Performances et synthèse 28
2.5 Conclusion 30

2.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre un éventail des principaux modèles mathématiques de description de la tâche de conduite. Formaliser l'intégralité du comportement d'un conducteur serait illusoire de part l'importance et la complexité des processus impliqués et de leurs interactions mutuelles. Neboît (Neboît, 1974) décrit la conduite comme une activité multi-processus, réalisant simultanément des tâches de natures et de fonctions différentes. La navigation est le processus de plus haut niveau de par l'implication de mécanismes cognitifs complexes. Elle prend en charge en particulier la planification d'itinéraires. Le guidage est un niveau plus procédural car il repose sur des règles apprises par le conducteur telles que le choix d'une distance inter-véhiculaire à maintenir lors d'un suivi de véhicule ou encore le respect de la signalisation routière. Enfin le pilotage se charge de l'exécution des manœuvres désirées. Il concerne alors les mécanismes sensorimoteurs de base, la manipulation des interfaces du véhicule (pédales, volant,...) pour obtenir un comportement désiré du véhicule (vitesse, position sur la voie,...). Nous retrouvons une approche similaire chez Michon (Michon, 1985) (voir figure 2.1). Par ailleurs l'exécution de ces différentes tâches n'est pas hermétique (interactions entre les niveaux cités ci-dessus) et peut être dégradée par des facteurs aussi bien internes tels que l'état de fatigue du conducteur, niveau de vigilance qu'externes comme la réalisation d'une tâche annexe (une conversation téléphonique).

Notre réflexion concerne les stratégies de commande que les conducteurs mettent en place pour contrôler leur véhicule et en particulier lorsque des évenements changent le contexte de conduite (en particulier la dynamique du véhicule piloté). Nous décidons alors de nous restreindre volontairement à cet aspect de pilotage de la conduite. Dans ce contexte, l'activité du conducteur a pour but d'assurer le contrôle longitudinal et latéral du véhicule. Le contrôle longitudinal regroupe en particulier le contrôle de la vitesse du véhicule, du freinage, de la gestion des autres véhicules. En parallèle la prise de virages, les changements de file et plus généralement la position sur la voie sont les tâches qui incombent au contrôle latéral du véhicule. Nous présenterons ainsi un état de l'art des modèles de conducteurs pour les deux catégories issues la distinction faite précédemment. Nous insisterons particulièrement sur l'adéquation de cet existant vis-à-vis de notre problématique.

2.2 Une approche holistique

Le comportement d'un opérateur pilotant un système a fait l'objet de nombreuses recherches. Elles ont en particulier permis de mettre en évidence une

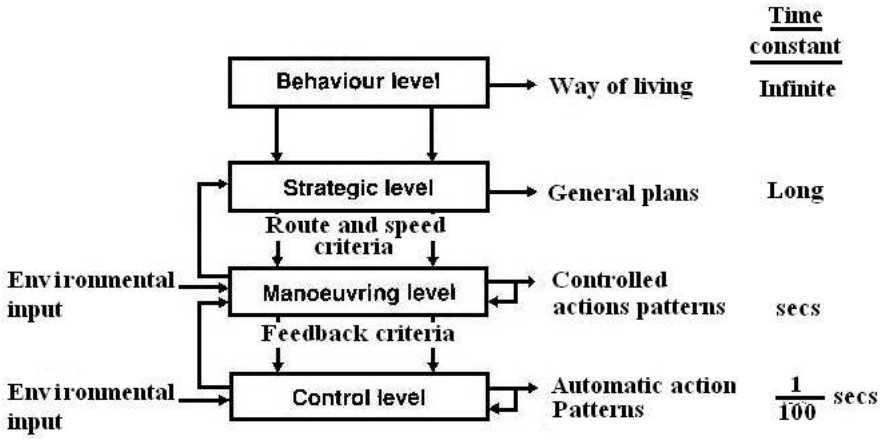


FIGURE 2.1 – Description hiérarchique de la tâche de conduite selon Michon (Michon, 1985). Le niveau stratégique, le plus élevé, met en jeu des mécanismes cognitifs complexes, il assure en particulier la navigation (la planification, le choix d'itinéraires). Le niveau manœuvre met en jeu des procédures, règles acquises lors de l'apprentissage de la conduite. Le niveau contrôle concerne les aspects sensorimoteurs de base mettant en œuvre les actions choisies par le conducteur.

caractéristique propre aux opérateurs : leur capacité d'adaptation. En effet il a été remarqué que ceux-ci avaient tendance à donner au système global Homme-Machine une dynamique similaire et ce quelles que soient les consignes qui leur étaient demandées de suivre ainsi que le type de système manipulé. En reprenant la description proposée figure 2.2 et en notant respectivement $H(s)$ et $M(s)$ les fonctions de transfert de la dynamique de l'opérateur et du système piloté exprimées suivant le formalisme de Laplace, McRuer (McRuer et Krendel, 1962) propose que le comportement en boucle fermée du système global Homme-Machine est tel que son comportement en boucle ouverte soit de la forme d'un intégrateur proportionnel retardé (voir équation 2.1).

$$H(s).M(s) = \frac{\omega_c.e^{-\tau.s}}{s} \tag{2.1}$$

L'originalité du modèle $cross - over$ réside dans son encapsulation des composants Homme et Machine. Deux paramètre permettent d'en décrire l'interaction, la fréquence $cross - over$ ω_c et le retard global de cet ensemble τ. Les paramètres du modèle $cross - over$ dépendent évidement du système piloté mais aussi des caractéristiques de la consigne à suivre. Certains auteurs ont ainsi établi des jeux de paramètres du modèle pour différents types de systèmes pilotés et de consignes (McRuer et Krendel, 1974). L'interaction entre ces deux entités est en quelque sorte conservée, ce qui diffère largement des approches où

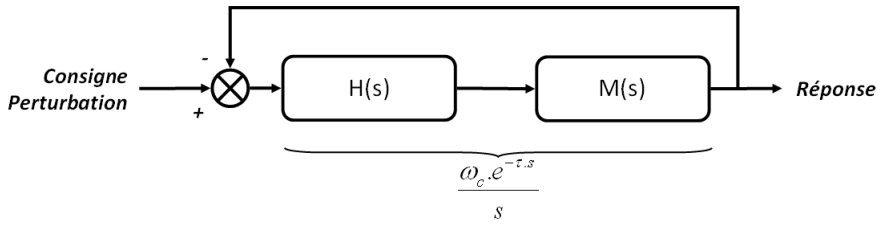


FIGURE 2.2 – Structure du Modèle $cross-over$ selon McRuer et Krendel, 1962. Le comportement global en boucle fermé de ce système est tel que $H(s).M(s)$ s'apparente à un correcteur proportionnel intégral retardé.

les éléments sont décrits séparément au préalable puis connectés ensemble pour en faire émerger l'interaction. D'une certaine manière, l'approche $cross-over$ permet d'intégrer la façon dont l'operateur décide de suivre la consigne qui lui est proposé. Cette description est en cela holistique car elle prend en compte intrinsèquement l'ensemble des interactions entre l'opérateur, le système manipulé et l'environnement dans lequel se déroule la tâche.

Weir et al (Weir et Chao, 2007) rappellent que cette description n'est qu'une approximation précise de l'interaction autour de la fréquence $cross-over$. Toutefois sont intérêt s'avère relativement limité pour étudier l'interaction avec des systèmes inconnus. Si le modèle $cross-over$ décrit la dynamique global de cette interaction il ne permet pas pour autant de fournir des informations sur les stratégies de commande que l'opérateur met en place pour y parvenir.

Cette approche peut être utilisée pour la modélisation du comportement conducteur mais de manière détournée. Il suffit pour cela d'isoler le terme $H(s)$ de l'équation 2.1, la fonction $M(s)$ étant généralement connue. Nous retrouvons alors cette technique à la fois pour décrire le contrôle longitudinal (en vitesse) du véhicule (Weir et McRuer, 1968, Weir et Chao, 2007) mais aussi le contrôle latéral (Weir et Chao, 2007, Toffin et al., 2007). Remarquons que cela suppose un apprentissage préalable du conducteur et ne permet pas d'étudier les réactions de ce dernier face à un système dynamique piloté changeant. Toutefois le modèle $cross-over$ s'avère être utilisé comme un outil de validation de modèles de conducteur car il fournit un comportement de référence vers lequel un modèle proposé doit tendre.

2.3 Le contrôle longitudinal du véhicule

2.3.1 Contrôle en suivi de véhicule

L'étude du comportement des conducteurs en situation de suivi de véhicule débute dès les années 1950 (Chandler et al., 1958, Gazis et al., 1959) et ce dans le cadre plus général de l'analyse du trafic routier. Ces premiers modèles ouvrent la voie à la modélisation du contrôle longitudinal du véhicule. Nous choisissons de ce fait de nous placer dans le contexte d'un trafic routier composé de deux véhicules. L'état longitudinal de chaque véhicule est alors décrit par sa propre position sur la voie (notée x), sa vitesse (notée v) et son accélération (notée a). A ces variables d'état est apposé un indice, L pour le véhicule suivi ($Leader$) et F pour le véhicule suiveur($Follower$). C'est alors la stratégie de conduite du véhicule suiveur qui est décrite en fonction de l'évolution de l'état du véhicule suivi.

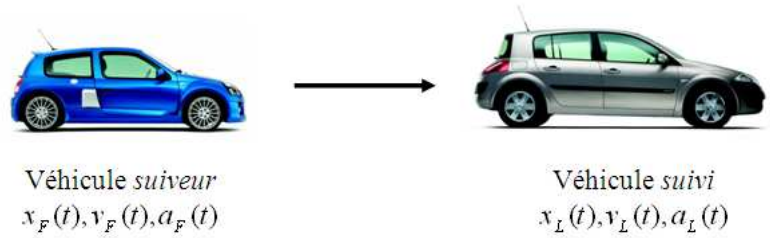


FIGURE 2.3 – Notations. Les véhicules suiveur (indice F) et suivi (indice L) sont caractérisés par la position, vitesse et accélération longitudinales. Le contexte d'étude est ainsi restreint à un trafic composé de seulement deux véhicules.

Les modèles de type "stimulus-réponse"

Ces modèles précurseurs ont pour origine l'hypothèse selon laquelle le déclenchement des actions des conducteurs (accélération, freinage) a pour cause des stimuli externes tels que la variation d'une distance inter-véhicule. Ces modèles sont formulés à partir de l'expression générique suivante :

$$r_F(t) = K(t-T).S_{F,L}(t-T) \tag{2.2}$$

Le conducteur du véhicule suiveur produit une action $r_F(t)$ à un instant t en réponse à un stimulus $S_{F,L}(t-T)$ dépendant à la fois du véhicule suivi et suiveur. La réponse est linéaire vis-à-vis du stimulus(d'un cœfficient $K(t-T)$ appelé sensibilité) et retardé d'une durée T. Ce terme de retard est global et décrit les temps de perception, de traitement et de réalisation de l'action.

Le premier modèle de ce genre apparaît à la fin des années cinquante (Chandler et al., 1958). Chandler propose un modèle dont le stimulus est la différence de vitesse entre le véhicule suivi et le véhicule suiveur. Ce modèle fut testé sur des données expérimentales obtenues auprès de huit sujets. Le cœfficient de sensibilité K, supposé constant, en limite la validité lorsque les conditions de conduite telles que l'état du trafic varient. Le modèle de Chandler prend la formulation mathématique suivante :

$$a_F(t) = K.(v_L(t-T) - v_F(t-T)) \tag{2.3}$$

L'avantage de ce modèle réside dans sa simplicité en terme de calculs, de mise en œuvre et d'estimation de ses paramètres en nombre réduit. Toutefois il suppose que les conducteurs ont la capacité d'évaluer la vitesse relative entre les deux véhicules. Gazis et al (Gazis et al., 1959) rendent plus complexe le modèle de Chandler en supposant que le terme de sensibilité est inversement proportionnel à la distance entre le véhicule suivi et le véhicule suiveur. Ainsi la sensibilité augmente à mesure que la distance relative entre les deux véhicules diminue, conférant une meilleure réactivité du conducteur et ce dès la moindre variation de vitesse relative. A contrario, le conducteur réagit peu lorsqu'il se retrouve éloigné du véhicule suivi.

Afin de rendre le modèle toujours plus représentatif et pour un maximum de conditions de trafic, il connaît de multiples évolutions pour devenir le modèle généralisé de General Motors (Gazis et al., 1959, voir equation 2.4).

$$a_F(t) = c.\frac{v_F^m(t-T)}{(x_L(t-T) - x_F(t-T))^l}.(v_L(t-T) - v_F(t-T)) \tag{2.4}$$

Le terme de sensibilité dépend de trois paramètres c, m et l. Les quantités m et l restreintes aux valeurs entières sont par la suite étendues à des valeures rationnelles. Si ces évolutions améliorent la corrélation entre les prédictions du modèle et les données expérimentales, sa complexité croît (nombre de paramètres, domaine de définition, d'existence du modèle) et l'interprétation physique de ses paramètres s'avère moins immédiate.

Newell propose également un modèle de type "Stimulus-Réponse" simplifié se basant uniquement sur l'estimation d'indices relatifs à des distances (Newell, 2002). Le comportement du conducteur du véhicule suiveur se résume à la reproduction de celui du véhicle suivi modulo un temps de réaction T et une distance inter-véhicule désirée D :

$$x_F(t) = x_L(t-T) + D \tag{2.5}$$

Le modèle de Leutzbach

Leutzbach propose une solution similaire au modèle General Motors (Leutzbach et Wiedemann, 1986), toutefois la réactivité du conducteur n'augmente pas avec la diminution de la distance inter-véhicule mais avec le rapprochement d'une distance minimale notée S. Le modèle ne dépend alors que de deux paramètres, le temps de réaction T et cette distance inter-véhicule minimale S. Leutzbach fait par ailleurs intervenir l'accélération du véhicule suivi. Le modèle prend alors la forme suivante :

$$a_F(t) = \frac{1}{2}.\frac{(v_L(t-T) - v_F(t-T))^2}{S - (x_L(t-T) - x_F(t-T))} + a_L(t-T) \tag{2.6}$$

Les modèles linéaires

Cette approche (Helly, 1959, Hanken et Rockwell, 1967, Aron, 1988) se base sur différents indices pour l'élaboration par le conducteur de la consigne d'accélération à appliquer à son propre véhicule. Ces modèles se présentent alors sous la forme d'une somme pondérée de ces différents indices. Il est alors supposé que les conducteurs sont capables de les estimer. L'expression mathématique de ces modèles est alors comme suit :

$$a_F(t) = A.(v_L(t-T) - v_F(t-T)) + B.(x_L(t-T) - x_F(t-T) - D(t)) \tag{2.7}$$

$$D(t) = c + d.v_F(t-T) + e.a_F(t-T) \tag{2.8}$$

Nous trouvons une approche similaire dans les travaux de Boer (Boer, 2005a, Boer, 2006). Cependant ce dernier fait intervenir le Time Headway comme consigne de référence du conducteur. Le Time Headway représente la durée nécessaire au conducteur pour parcourir la distance qui le sépare du véhicule qu'il suit, tout en maintenant sa vitesse constante. La forme du modèle est alors :

$$a_F(t) = A.(v_L(t) - v_F(t)) + B.(x_L(t) - x_F(t) - d_{Headway}) + D.v_L(t) \tag{2.9}$$

Dans cette formulation, le Time Headway n'apparaît pas comme une durée mais comme la distance qu'il représente. Nous remarquons que ce modèle n'intègre pas de notion de temps de réaction du conducteur. Ce modèle a été utilisé en particulier pour étudier le comportement de conduite dans un contexte de brouillard.

Les modèles de type distance de sécurité et optimaux

Selon cette approche, le conducteur est supposé contrôler sa vitesse de sorte à maintenir entre son véhicule et celui le précédant une distance lui permettant d'éviter tout risque de collision en cas de freinage brusque du véhicule suivi.

Kometani et Sasaki (Kometani et Sasaki, 1959) développent un modèle basé sur le principe fondamental de la dynamique :

$$x_F(t-T) - x_L(t-T) = A.v_L^2(t-T) + B.v_F^2(t) + C.v_F(t) + D \qquad (2.10)$$

Ce modèle non linéaire fait apparaître cinq paramètres à identifier. T représente le temps de réaction du conducteur. A se réfère à la capacité maximale de freinage du véhicule suivi et B à celle du conducteur. La signification des paramètres C et D n'est pas précisée. Ce modèle présente l'intérêt de dépendre de paramètres décrivant les connaissances du conducteur sur les capacités dynamiques du véhicule en freinage, capacités pouvant être rendues dépendantes du contexte de conduite par exemple (route séche, mouillée,...).

Gipps (Gipps, 1981) propose un modèle basé sur la même idée. A représente l'accélération maximale que le véhicule peut fournir. S est assimilé à une constante et représente la distance inter-véhicule désirée par le conducteur. B définit le freinage maximal que le conducteur peut obtenir de son véhicule, V la vitesse maximale et C les capacités de freinage estimées du véhicule suivi. Les cœfficients 2.5 et 0.025 sont proposés par l'auteur.

$$v_F(t+T) = v_F(t) + A.T.(1 - \frac{v_F(t)}{V}).\sqrt{0.025 + \frac{v_F(t)}{V}} \qquad (2.11)$$

$$v_F(t+T) = B.T.\sqrt{B^2.T^2 - B(x_L(t-T) - x_F(t-T) - S) - v_F(T).T - \frac{v_L(t)}{V}} \qquad (2.12)$$

Dans ce modèle, le conducteur dispose de deux commandes en vitesse dont il choisit par sécurité celle dont la valeur est la plus faible. L'une (voir equation 2.11) lui assurant une compatibilité avec sa vitesse et son accélération désirées (non prise en compte des autres véhicules du trafic), l'autre (voir équation 2.12) lui garantissant d'éviter toute collision avec le véhicule suivi en cas de freinage inopportun. Notons par ailleurs qu'aucune indication n'est donnée sur le domaine d'existence du modèle. Une évolution de ce modèle est proposée par Krauss (Krauss, 1997) et intègre un terme stochastique qui introduit en quelque sorte un bruit sur le choix de la vitesse que le conducteur désire atteindre.

A l'instar des modèles de type évitement de collision, Bando et al proposent (Bando et al., 1995) que le conducteur régule sa vitesse non pas en se basant sur celle du véhicule qu'il suit mais sur une vitesse lui garantissant en cas de freinage brusque d'éviter tout risque de contact avec le véhicule suivi :

$$a_F(t) = A.(v_{opt}(t-T) - v_F(t-T)) \qquad (2.13)$$

$$v_{opt}(t-T) = \sqrt{2.B.(x_L(t-T) - x_F(t-T))} \qquad (2.14)$$

Le paramètre A est similaire au terme de sensibilité enoncé dans le modèle de Chandler (Chandler et al., 1958).La vitesse optimale est obtenue à partir de la décélération maximale B autorisée sur la distance séparant les deux véhicules.

2.3.2 Performances et synthèse

Ranjitkar et al (Ranjitkar et al., 2005) ont réalisé une expérimentation afin de comparer les performances de certains des modèles cités précédemment (modèles Chandler, GGM, Gipps, Krauss, Vitesse Optimale, Newell, Automate Cellulaire et Leutzbach). Les essais furent réalisés sur piste, constituée de deux lignes droites de 1200 m et de deux demi cercles de 150 m de long. Dix sujets participèrent à cette campagne de mesures. Les données n'étaient exploitées que sur ces deux lignes droites. Plusieurs profils de vitesse ont été testés (aléatoires, sinusoïdes de différentes fréquences, etc.). La vitesse moyenne était environ de 60 km/h. Les performances des modèles furent calculées sur leurs erreurs de prédiction d'inter-distance, de vitesse et d'accélération. Les auteurs observent alors que les modèles de Chandler et GGM présentèrent les meilleures performances en terme d'estimation de vitesse et d'accélération. Les meilleures estimations de distance inter-véhiculaire furent obtenues par le modèle de type automate cellulaire. Notons au passage que pour l'estimation des inter-distances, il fallut calculer cette grandeur qui n'était pas directement accessible, ce qui n'était pas le cas pour l'estimation des vitesses. Toutefois selon les conducteurs, les performances des modèles ne présentaient pas les mêmes tendances. En effet, le modèle de Leutzbach a fourni, pour un des sujets, les meilleures performances à la vue des autres modèles alors que ce ne fût pas le cas pour les autres conducteurs.

Panwai et al (Panwai et Dia, 2004) ont développé un modèle de conducteur basé sur une structure d'agent réactif. Ces agents ont pour objectif de caractériser, de modéliser le lien entre la perception et l'action. Panwai a alors recours à des réseaux de neurones afin de mettre en œuvre ces agents. Le choix des réseaux de neurones s'explique par leur capacité à traiter des dynamiques non linéaires ainsi que le bruit présent sur ses entrées. Le modèle a été testé sur des données "route". Elles ont été collectées par le Robert Bosch GmbH Research Group sur une route allemande. Les performances du modèle furent alors comparées à celles obtenues par le modèle Gipps. En regard des critères de performance considérés (RMS sur la distance en particulier), le modèle type agent réactif s'est montré supérieur en terme de qualité de prédiction. Toutefois l'auteur rappelle que ce type de modèle nécessite des jeux de données relativement conséquents afin de calibrer le réseau de neurones. Par ailleurs aucune information n'est délivrée sur l'interprétation possible de la structure de ce ré-

seau. Cette approche est en effet orientée "simulation de trafic" et recherche à imiter le comportement de l'ensemble des véhicules sur la route et non pas à décrire les comportements individuels.

Lee et Peng (Lee et Peng, 2004) analysent les modèles classiques de suivi de véhicule (modèles Chandler, GGM, Gipps, Linéaire, Vitesse Optimale, et modèle Newell). Ces modèles furent testés sur des données réelles issues des bases de données SAVME et ICC FOT. Il s'agit d'enregistrements réalisés aux Etats-Unis en zone urbaine et sur autoroutes. Leur méthode consista en l'extraction de paires de véhicules (suiveur et suivi) et d'identifier pour le véhicule suiveur, les paramètres de chaque modèle. Une fois cette optimisation réalisée, l'évaluation des performances des modèles fut calculée à partir de la corrélation entre le profil de vitesse du véhicule suiveur et celui prédit par ces modèles. Il ressortit de cette étude qu'en situation où le véhicule suivi ralentissait, les différents modèles présentaient des performances similaires. Toutefois pour des situations où l'attention du conducteur est moins sollicitée, le modèle de Gipps présentait une certaine robustesse, ce qui fit défaut aux autres modèles.

Pour conclure sur les modèles de conducteur dédiés au suivi de véhicule, nous illustrerons certains aspects de notre propos par des résultats obtenus suite à une expérimentation sur le simulateur dynamique de conduite CARDS2. Dans cette expérimentation, la tâche demandée aux sujets (trente) était de suivre un véhicule lièvre en se maintenant à une distance de sécurité telle que le temps inter-véhiculaire soit de l'ordre de 2s. Le véhicule lièvre alternait les périodes de conduite à vitesse constante, les accélérations et décélérations inopinées. Par ailleurs les sujets testèrent plusieurs conditions de conduite dont en particulier la conduite avec et sans régulateur de vitesse. Plusieurs des modèles présentés ci-dessus ont été calibrés et des jeux de paramètres ont alors été extraits pour chaque modèle et pour chaque sujet. Si nos résultats sur les performances des modèles sont similaires à ceux obtenus dans d'autres études (Ranjitkar et al., 2005, Lee et Peng, 2004), ils nous apportent par ailleurs certaines informations relatives à leur utilisation. L'intérêt d'un modèle ne réside pas dans la calibration de ses paramètres mais dans leur signification. Ainsi le modèle de Chandler (Chandler et al., 1958) présente des paramètres dont l'interprétation est aisée. Comparativement, le modèle General Motors Généralisé (Gazis et al., 1959) est quant à lui beaucoup plus complexe, en particulier quelles significations donner à ses paramètres élevant ses termes à des puissances diverses ?

Nous remarquons d'emblée que pour ces modèles l'estimation des différents paramètres intervenant dans le calcul de la commande à appliquer au véhicule est idéale : pas de biais ni de bruit. Il en est de même pour la réalisation des com-

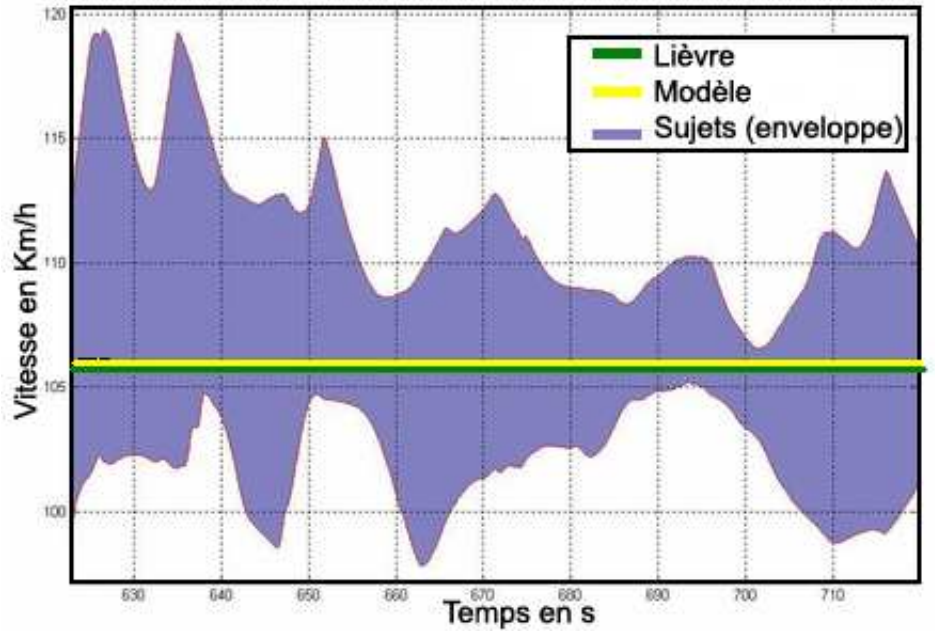


FIGURE 2.4 – Ce graphique représente l'enveloppe des profils de vitesse des conducteurs (zone violette), des modèles de Chandler calibré pour chacun d'eux (zone jaune) ainsi que le profil de consigne en vert. En régime permanent, les différents jeux de paramètres du modèle fournissent le même résultat. Les différences inter-sujets sont importantes et le caractère peu excitant de la consigne à suivre révèlent d'autant plus ces disparités (par rapports aux phases de freinage ou d'accélération).

mandes alors élaborées. Les bruits sensorimoteurs et les erreurs qu'ils induisent participent à la variabilité intra-conducteur, leur négligence apporte alors une répétabilité non naturelle. Enfin un phénomène de dérive apparait lors de phase de conduites peu stimulatrices comme le suivi de véhicule à vitesse constante (voir figure 2.5). La totalité des modèles étudiés convergent rapidement vers un régime permanent alors que la vitesse des conducteurs fluctue sans cesse lors de nos observations sur simulateur (voir figure 2.4). Toutefois, il ne faut pas écarter l'hypothèse selon laquelle l'amplitude de ce phénomène peut être réduite ou amplifiée lors d'une conduite réelle. La calibration des paramètres des modèles lors de ces phases pauvres en informations est alors peu pertinente, tout comme l'interprétation qui peut en être faite. De ce fait, il est envisageable pour caractériser un conducteur de disposer n'ont pas d'un mais de plusieurs jeux de paramètres cohérents avec les différentes situations de conduite (freinage d'urgence, roulage à vitesse constante, ...). La commutation automatique entre ces jeux de paramètres signifierait une approche plus haut niveau ne

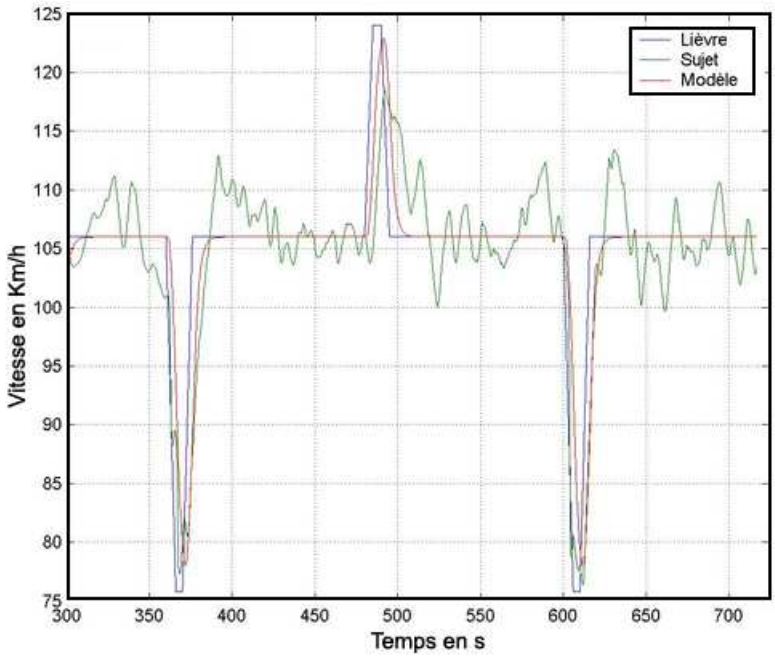


FIGURE 2.5 – Exemple du profil de vitesse observé pour un sujet (courbe verte) et profil prédit par un modèle de suivi calibré (courbe rouge). Le profil de vitesse du véhicule suivi est décrit par la courbe bleue. Lors de la phase de conduite à vitesse constante, le modèle converge vers la consigne alors que le profil de vitesse du sujet présente des fluctuations de l'ordre de 5% autour de la vitesse de consigne. Il ressort clairement que le comportement du modèle, calibré sur l'ensemble de la phase de conduite (400s) présente une incohérence avec celui du sujet.

se limitant pas seulement aux aspects pilotage de la conduite mais intégrant des capacités décisionnelles (niveau maœuvre). Certains auteurs comme Kuge (Kuge et al., 2000) proposent une approche basée sur des Modèles de Markov Cachés capables de commuter selon les circonstances sur des modèles adéquats.

Nous notons par ailleurs que les différents modèles cités pour le suivi de véhicule intègrent seulement un temps de réaction global (perception - traitement - action) des conducteurs sans faire intervenir leurs capacités d'anticipation. Le modèle de Leutzbach (Leutzbach et Wiedemann, 1986) déroge en quelque sorte à cette règle car sa stratégie se base entre autre sur la connaissance et l'utilisation de niveaux de freinages maximaux. Il est donc rare que les modèles possèdent une représentation interne de la dynamique du véhicule piloté, comme si le maintien de la vitesse ou de la distance inter-véhicule était exclu-

sivement réalisée par un contrôle en boucle ouverte. Il apparait alors complexe d'utiliser ces modèles pour l'étude du comportement du conducteur face à des changements de dynamique véhicule ou à l'utilisation de systèmes d'assistance tels qu'un régulateur de vitesse ou un A.C.C. (régulateur de vitesse avec gestion de la distance inter-véhicule). De plus les interfaces du véhicule ne sont pas prises en compte explicitement. Il n'est donc pas possible d'évaluer l'impact d'un hypothétique dispositif qui modifierait par exemple la raideur de la pédale d'accélération selon le contexte. Enfin une majorité des modèles présentent un comportement symétrique lors des phases de freinage et d'accélération, symétrie que l'on ne retrouve pas au niveau de la dynamique du véhicule. Le dosage de la pédale d'accélération et de freinage sera alors différent pour des variations de vitesse de même amplitude.

2.4 Le contrôle latéral du véhicule

Parmi les modèles qui seront présentés ci-dessous, certains (Allen et Chrstos, 2002, Bayliss, 2005) mêlent le contrôle longitudinal et latéral du véhicule. Afin d'éviter toute redondance avec le pararagraphe précédent, nous concentrerons notre démarche sur la composante contrôle latéral uniquement. Notons toutefois que la stratégie de contrôle de la vitesse du véhicule en virage peut faire intervenir des indices non disponibles en conduite en ligne droite tels que la courbure de la route ou encore l'accélération latérale du véhicule (Allen et Chrstos, 2002).

En s'inspirant des études des tâches de poursuite visuomotrices, Weir et McRuer (Weir et McRuer, 1968) proposent une architecture générique à plusieurs niveaux pour décrire la tâche de conduite dont l'application au contrôle latéral du véhicule prends la forme décrite figure 2.6. La réalisation d'une consigne de trajectoire est réalisée par deux niveaux distincts. Le niveau de poursuite se base sur la connaissance qu'a le conducteur de son véhicule. Ce niveau assure un contrôle de type boucle ouverte qui dans l'idéal est suffisant pour contrôler le véhicule. Le second niveau dit de compensation est de type boucle fermée par rétroaction négative, il permet entre autre de corriger les conséquences des imperfections et des incertitudes du niveau de poursuite. L'utilisation exclusive du niveau de compensation est mise à mal lors de mouvements rapides et ce de part les contraintes physiologiques intrinsèques des conducteurs. Les nombreuses approches et tentatives de description du contrôle latéral du véhicule présentent généralement une caractéristique commune : la capacité d'anticipation et de prédiction des conducteurs. L'anticipation est une qualité essentielle dans les tâches de poursuite visuomotrice et à fortiori dans la conduite automobile (MacAdam, 1980). Elle définit la capacité de tout opé-

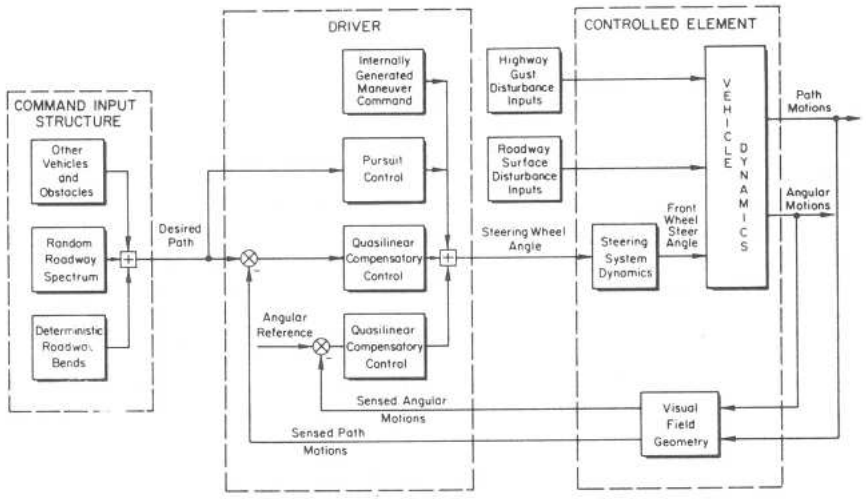


FIGURE 2.6 – Description de l'interaction Conducteur-Vehicule-Environnement pour le contrôle de trajectoire (Weir et McRuer, 1968). La stratégie de commande du conducteur repose principalement sur plusieurs boucles de contrôle imbriquées. La boucle ouverte appelée poursuite génère l'angle volant nécessaire pour obtenir la trajectoire désirée. Les boucles fermées dites de compensation corrigent les erreurs de trajectoire provenant en partie de l'inexactitude des consignes produites par la boucle de poursuite.

rateur à planifier ses actions non pas pour atteindre un état désiré à l'instant courant mais à un instant futur. Cette durée séparant ces deux instants est couramment appelée horizon. Ce comportement d'anticipation s'observe en particulier lorsque le conducteur oriente son regard vers le point de corde du virage qu'il se prépare à engager (Mars et al., 2004).

Suite au choix de l'état à atteindre à un horizon déterminé, le conducteur doit produire une action permettant de l'atteindre. Il est alors supposé que le conducteur puisse prédire l'évolution de l'état de son véhicule. Il est suggéré que les conducteurs disposent d'une représentation interne, sans doute approximative, de la dynamique de leur véhicule les autorisant à la fois à prédire les conséquences de leurs actions sur les interfaces de commandes mais aussi comment les manipuler pour obtenir un mouvement désiré (Wolpert et Ghahramani, 2000, Dingwell et al., 2002). En combinant anticipation et prédiction, le conducteur dispose alors d'informations suffisantes pour contrôler son véhicule de manière souple et contrer ses propres limitations physiologiques (retards sensoriels et moteurs, traitement des signaux sensoriels et élaboration des consignes motrices). Toutefois Warren et al (Warren et al., 1988) montrent

qu'une extrapolation par un développement de Taylor (et donc sans faire appel à des modèles internes) offre des performances acceptables.

Les modèles de conducteur pour le maintien de trajectoire reçoivent en entrée des informations relatives à la route et à l'état du véhicule (rayon de courbure d'un virage, distance entre le bord de la route et le véhicule, accélération latérale du véhicule,...) et produisent généralement en sortie un angle volant à appliquer (nous trouvons dans Hayoe, 1979 une consigne basée sur la vitesse de l'angle volant), une consigne de vitesse pour les modèles intégrant un contrôle de celle-ci.

2.4.1 Les modèles quasi linéaires

Il s'agit principalement de modèles dont la description de la tâche de conduite se restreint au niveau de compensation énoncé précédemment (Weir et McRuer, 1968) et se présentent sous la forme de fonctions de transfert linéaires à cœfficients constants. Certains auteurs (Weir et McRuer, 1968) décrivent toutefois chacun des niveaux de poursuite et de compensation par des approches similaires au modèle crossover. Ces régulateurs corrigent généralement l'écart latéral du véhicule sur la voie (Peng et Ulsoy, 1997). D'autres auteurs intègrent de multiples indices de corrections, Allen et al (Allen et Chrstos, 2002) proposent ainsi une approche linéaire où le conducteur base sa stratégie de correction de trajectoire sur des erreurs de position latérale, de courbure de trajectoire et de vitesse de lacet. Ces modèles intègrent également un terme de retard décrivant le temps global de réaction du conducteur. Des auteurs comme (Peng et Ulsoy, 1997) proposent d'assimiler le comportement du conducteur à un régulateur de type Proportionnel-Dérivé (P-D), le terme de dérivation ayant alors des effets stabilisateur sur la boucle fermée. En effet, le correcteur P-D peut être interprété comme un régulateur proportionnel non pas sur une erreur courante mais sur une prédiction de celle-ci (par le terme de dérivation) à un horizon temporel déterminé. Cette qualité de prédiction contrebalançant les contraintes physiologiques du conducteur. Ces approches se cantonnent à l'étude des effets sur la boucle Conducteur-Véhicule de perturbations de faibles amplitudes. Nous retrouvons une approche similaire dans Bayliss, 2005 ou le comportement compensatoire du conducteur est décrite par un régulateur de type P-I-D.

2.4.2 Les modèles optimaux

Cette approche se base sur les qualités d'anticipation et de prédiction du conducteur citées précédemment. L'objectif que se fixe le conducteur est d'atteindre un certain état désiré de son véhicule, à un horizon temporel donné. La consigne à appliquer au véhicule est alors optimale car obtenue en minimi-

sant une fonction de coût. Il est alors fréquemment supposé que le conducteur dispose d'une représentation interne de la dynamique de son véhicule (MacAdam, 1980, Guo et Guan, 1993). Celle-ci est alors exprimée sous forme d'état suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A.x + B.u \\ y &= C.x \end{aligned} \tag{2.15}$$

La variable $x(t)$ représente le vecteur d'état du système décrivant la dynamique du véhicule. La consigne appliquée par le conducteur (ici l'angle volant) est notée $u(t)$. La sortie du système est représentée par $y(t)$. Le critère à minimiser est alors l'erreur de trajectoire à venir (voir équation 2.16 inspirée de MacAdam, 1980), pouvant être complété par d'autres indices tels que le lacet du véhicule (Sharp et al., 2000, Sharp et Valtetsiotis, 2001), voir la vitesse latérale du véhicule (Ungoren et Peng, 2005).

$$J(t) = \int_{t}^{t+Tp} (y_d(x) - y(x))^2.dx \tag{2.16}$$

Ungoren et Peng (Ungoren et Peng, 2005) proposent un schéma de mise à jour des paramètres de cette représentation interne suite à un changement des caractéristiques dynamiques du véhicule piloté (voir figure 2.7). L'apprentissage est réalisé au préalable de manière récursive à partir de différents jeux de données (modèle CARIMA du quatrième ordre). Les auteurs suggèrent la possibilité de combiner de manière simultanée contrôle du véhicule et apprentissage de sa dynamique, sans le démontrer.

2.4.3 Caractéristiques biomécaniques

Au travers de ces différentes approches, il apparaît que les attentions portent principalement sur la manière dont le conducteur élabore la consigne d'angle volant à appliquer. Ainsi il est fréquent d'observer (Ungoren et Peng, 2005) que cet angle volant désiré devient sans autres transformations la position courante du volant (voir figure 2.8). Or dans le cadre d'interactions avec des périphériques à retour d'effort tels qu'un volant de voiture ou une pédale active, cette description se révèle insuffisante. Par exemple, il est évident qu'un conducteur aura d'autant plus de difficultés à atteindre une certaine position angulaire du volant que le couple de rappel au niveau de ce dernier sera élevé. Toutefois, certains auteurs tentent d'intégrer certaines propriétés du système neuromusculaire (SNM). Une approche courante employée dans la modélisation du comportement d'opérateurs dans la réalisation de tâches de poursuite (Magdaleno et McRuer, 1971, McRuer et al., 1967, McRuer et al., 1968b) et que l'on retrouve en particulier chez Allen et al (Allen et Chrstos, 2002) est d'assimiler le

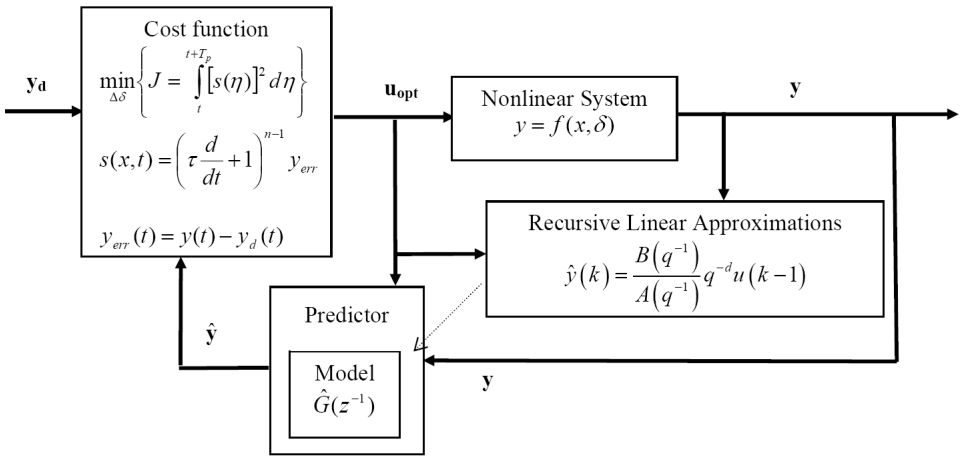


FIGURE 2.7 – Modèle adaptatif de conducteur par Ungoren et Peng, 2005. Le modèle interne est direct. Il s'agit d'une linéarisation de la dynamique latérale du véhicule à un point de fonctionnement donné. L'intérêt majeur de ce modèle est sa versatilité : la calibration de son modèle interne à différents types de véhicule se révelle quasiment automatisée, moyenannt toutefois une phase de calibration préalable (pas de calibration/contrôle simultanés).

SNM à une fonction de transfert linéaire du second ordre associé à un terme de retard pur (voir équation 2.17).

$$H_{SNM}(s) = \frac{\omega_n^2.e^{-\tau.s}}{s^2 + 2.\zeta_n.\omega_n.s + \omega_n^2} \tag{2.17}$$

Cette représentation lie directement l'angle désiré du volant (consigne) et sa position réelle (courante). La dynamique du volant n'y apparait pas explicitement. Notons qu'Allen et al. (Allen et Chrstos, 2002) proposent comme paramétrage de ce modèle du système neuromusculaire un délai psychomoteur τ égal à 50ms, un cœfficient d'amortissement ζ_n de 0.5 et une pulsation propre ω_n à 20rad/s. La pulsation ω_n représente en quelque sorte la vitesse de réalisation de la consigne, plus celle-ci est élevée, plus le régime permanent est atteint rapidement, en dépit d'un dépassement de consigne plus important et l'éventualité d'apparition d'oscillations selon la valeur du coefficient de viscosité musculaire ζ_n. Par ailleurs, il ressort que l'erreur statique d'un tel actionneur est nulle en réponse à un échelon (théorème de la valeur finale) : le régime permanent atteint toujours le niveau désiré. Cette caractéristique peut paraître peu réaliste si elle est confrontée au compromis "précision-vitesse"' observé dans les tâches manuelles de pointage (Harris et Wolpert, 1998).

Une approche originale que l'on retrouve en particulier dans les travaux

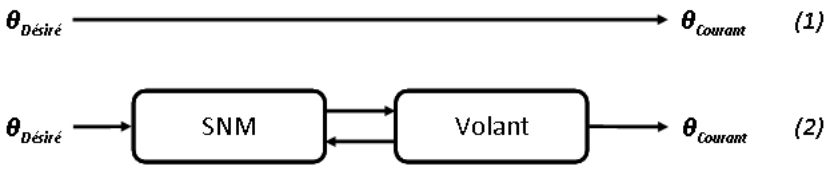


FIGURE 2.8 – L'interaction entre le conducteur et les périphériques de contrôle du véhicule est souvent négligée. Ainsi dans le cas du volant, la position angulaire désirée θ_{Desire} et la position courante $\theta_{Courant}$ sont généralement identiques (1). La description du système neuromusculaire (SNM) autorise alors l'étude de cette interaction (2).

de Toffin et al (Toffin et al., 2007) est de recourir au modèle $cross - over$ (McRuer et Krendel, 1962) pour décrire l'interaction entre le conducteur et son volant. Nous détaillons ci-dessous le cheminement proposé dans Toffin et al., 2007). Notons $H(s)$ la fonction de transfert du conducteur ayant pour entrée la consigne d'angle volant à appliquer et comme sortie le couple produit au niveau du volant. La dynamique du volant est décrite par la fonction de transfert $M(s)$. Le modèle $cross - over$ fournit la relation suivante dans le cas d'un conducteur adapté au volant qu'il manipule :

$$H(s).M(s) = \frac{\theta_{Courant}}{\theta_{Desire}} = \frac{\omega_c.e^{-\tau.s}}{s} \tag{2.18}$$

Le paramètre ω_c est appelé la pulsation $cross - over$ et τ exprime le temps de réaction neuromusculaire global. Le volant est assimilé à un système "masse-ressort" caractérisé par son inertie J_{Volant} et sa raideur Z_{Volant}. La dynamique du volant est alors décrite dans le domaine de Laplace sous forme d'une fonction de transfert (voir équation 2.19).

$$M(s) = \frac{1}{J_{Volant}.s + Z_{Volant}} \tag{2.19}$$

Les auteurs proposent alors une expression de la fonction de transfert du conducteur pour la manipulation du volant (voir équation 2.20) par combinaison des équation 2.18 et 2.19.

$$H(s) = \sqrt{\frac{\tilde{Z}_{Volant}}{J_{Volant}}}.(J_{Volant}.s + \frac{Z_{Volant}}{s}).e^{-\tau.s} \tag{2.20}$$

La pulsation $cross - over$ correspond à la pulsation de coupure du système manipulé ou plutôt de la représentation interne au niveau de l'opérateur du système, ici donc $\sqrt{\frac{\tilde{Z}_{Volant}}{J_{Volant}}}$. En toute rigueur, il devrait apparaître dans cette formulation de pulsation $cross - over$ non pas J_{Volant} mais l'estimation que le conducteur s'en fait, soit $\tilde{J}_{Volant}$. Toutefois ce choix semble cohérent car

dans leur travaux, Toffin et al. ne modifient pas l'inertie du volant J_{Volant} mais seulement sa raideur Z_{Volant}. Il est alors intrinsèquement supposé que le conducteur n'assimile pas les différents stimuli qui lui sont présentés comme provenant d'une modification de l'inertie du volant et de ce fait ne met pas à jour sa représentation interne. Notons enfin que lorsque le conducteur est parfaitement adapté à la dynamique du volant de son véhicule, les termes Z_{Volant} et $\tilde{Z}_{Volant}$ sont égaux. Si le modèle de Toffin et al. ne permet pas de décrire la manière dont le conducteur construit et met à jour les paramètres de ses modèle internes, il a toutefois permit de montrer qu'une modification de la raideur du volant ne pouvait être compensée par la mise à jour d'un autre paramètre du modèle interne de la dynamique du véhicule piloté.

Pick et Cole ont particulièrement étudié les caractéristiques biomécaniques des conducteurs dans leur façon de maintenir le volant (Pick et Cole, 2003, Pick et Cole, 2004, Pick et Cole, 2005, Pick et Cole, 2006b, Pick et Cole, 2007 et Pick et Cole, 2008). Ils se proposent dans Pick et Cole, 2003 d'adapter au contexte automobile l'approche de Paassen (Paassen, 1995). Ce dernier a démontré que la linéarisation sous la forme d'un système "masse-amortisseur-ressort" des caractéristiques biomécaniques de pilotes d'avions manipulant un joystick permettait de retranscrire globalement le comportement de ceux-ci. Ainsi Pick et Cole identifient les propriétés biomécaniques passives des conducteurs en leurs faisant maintenir un volant soumis à différents couples d'excitation (méthode de la séquence binaire pseudo aléatoire PRBS). Ils ont ainsi pu estimer les valeurs des paramètres de leur modèle (voir tableau 2.1) sous différentes conditions de maintien du volant : souple et raide. Ils ont ainsi mis en lumière l'effet de

Condition	Raideur, $N.m.rad^{-1}$	Viscosité, $N.m.s.rad^{-1}$	Inertie, $kg.m^2$
Souple	2.92 ± 1.19	0.61 ± 0.21	0.11 ± 0.018
Raide	56.42 ± 24.67	1.17 ± 0.35	0.11 ± 0.018

TABLE 2.1 – Identification des caractéristiques neuromusculaires moyennes de huit conducteurs sous différents niveaux d'excitation (type PRBS), d'après Pick et Cole, 2003 et Pick et Cole, 2006a. Il apparait que la co-contraction musculaire impacte principalement sur la raideur apparente, les variations de viscosité et d'inertie étant d'ampleur moindre.

la co-contraction musculaire sur la performance globale de maintien du volant (voir figure 2.9). Un autre résultat intéressant issu des travaux de Pick et Cole est l'influence du niveau couple volant sur les caractéristiques viscoélastiques des conducteurs. En effet, selon ce niveau de couple, la force produite par le conducteur varie et donc le nombre d'unités motrices recrutées et leur niveau

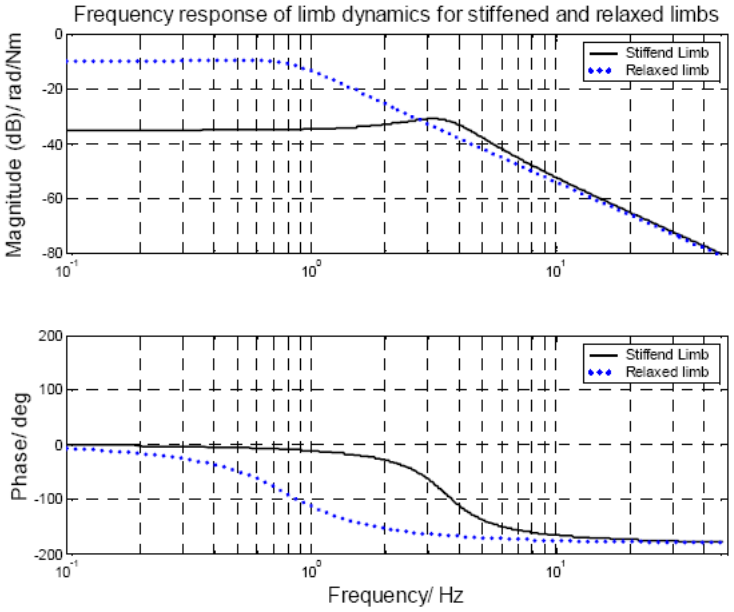


FIGURE 2.9 – Diagrammes de Bode de la fonction de transfert linéarisée du système neuromusculaire d'un conducteur (d'après Pick et Cole, 2003). La co-contraction musculaire accroît la bande passante du système neuromusculaire du conducteur.

d'activation aussi. Pick et Cole ont ainsi identifié la raideur et la viscosité apparente du conducteur en condition souple du maintien du volant (Pick et Cole, 2006a). Le signal d'excitation était alors la somme d'une séquence type PRBS et d'un couple constant. Ils ont alors mesuré une relation quasi-linéaire en la raideur musculaire et ce niveau constant de couple (voir figure 2.10).

Enfin, des enregistrements électromyographiques ont par ailleurs permis de corréler l'occurrence de cette co-contraction avec la réalisation de manœuvres typiques telles que la prise de virage.

2.4.4 Performances et synthèse

L'étude des performances des modèles de conducteur pour le maintien de la trajectoire du véhicule consistent généralement à valider la composante "anticipation-prédiction" de ces modèles. Ainsi il peut s'agir de démontrer l'intérêt de l'étape d'anticipation par rapport à des schémas de contrôle travaillant sur l'état courant du véhicule (Peng et Tomizuka, 1991). Peng observe en particulier qu'un schéma de contrôle de type prédictif réduit l'erreur de suivi (position latérale de la route) pour différents contextes de roulage. Les différents

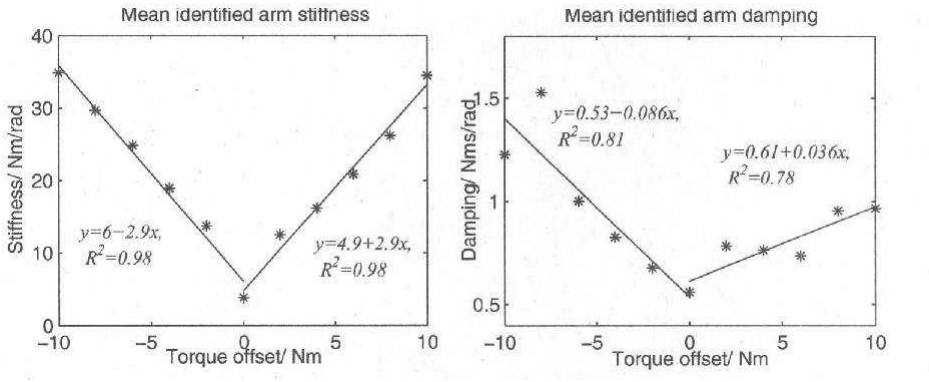


FIGURE 2.10 – Estimation de la raideur et de la viscosité musculaires en présence d'un couple d'$offset$. Les sujets sont en condition souple pour le maintien du volant (d'après Pick et Cole, 2006a).

scénarios de conduite rencontrés concernent des changements de files sur des portions de routes droites, des routes dont la courbure du profil est aléatoire ou encore la prise de virage (Peng et Tomizuka, 1991, Sharp et Valtetsiotis, 2001, Biral et Li, 2001).

La mise en œuvre de l'anticipation et de la prédiction est généralement issue de la théorie de la commande prédictive (Ungoren et Peng, 2005, McAdam, 1981) ou du contrôle linéaire quadratique (Peng et Tomizuka, 1991, Sharp et Valtetsiotis, 2001). Cole et al. (Cole et al., 2006) étudient les différences et similitudes de ces deux approches en terme de fonction de coût, d'horizon de contrôle et d'anticipation. Ils déduisent en particulier que les deux approches fournissent les mêmes performances pour des choix d'horizons de contrôle et d'anticipation suffisamment longs (supérieurs à la seconde).

A l'instar des modèles de contrôle longitudinal, les modèles de contrôle latéral ne traitent pas de la composante aléatoire de la tâche de conduite qu'ils décrivent. Nous notons toutefois que dans bien des approches, les notions d'anticipation et de modèle interne sont employées. Toutefois si les auteurs se concentrent sur les techniques mathématiques de leur mise en œuvre, largement inspirées de la théorie de la Commande, peu d'informations sur leur pertinence physiologique sont données. Enfin nous noterons les efforts engagés pour la description de l'interaction entre le système neuromusculaire et les périphériques de commande du véhicule.

2.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre différentes approches de description de la tâche de conduite au niveau contrôle et ce principalement pour le suivi de véhicule et le contrôle latéral. Cela ne signifie en aucun cas que les autres tâches sont délaissées des modélisateurs comme en particulier le comportement en situation de freinage, domaine en réalité très fertile. Les motivations à l'origine de ces restrictions sont liées aux développements prolifiques de systèmes d'assistance pour de telles tâches. Il nous semblait alors pertinent d'orienter notre regard en ce sens.

Nous pouvons retenir des approches citées que nombre d'entre elles se focalisent sur la manière dont le conducteur établi des signaux de consigne à appliquer au véhicule à partir de grandeurs telles que des distances, des vitesses. Peu d'entre elles tentent de décrire comment ces consignes sont effectivement réalisées. Nous remarquons de plus qu'il est généralement supposé que le conducteur se comporte tel un observateur idéal dont l'estimation de l'état du véhicule est exacte. Peu de place donc aux bruits sensoriels et moteurs. Enfin l'interaction entre le conducteur et le véhicule n'est pas explicitement décrite, supposée émerger du conducteur ne faisant alors preuve que d'un comportement de type compensatoire. Nous nécessitons alors de mieux comprendre les spécificités conducteur afin d'intégrer au plus juste ses caractéristiques pour en apprécier au mieux ses performances. Cela est l'objet du prochain chapitre qui a pour objectif de nous renseigner sur les limitations physiologiques des conducteurs.

Chapitre 3

Percevoir et agir : physiologie

Sommaire

3.1 Introduction 32
3.2 Le système nerveux central 32
3.3 Percevoir 34
3.3.1 Le système visuel 34
3.3.2 Le système vestibulaire 36
3.3.3 Le système proprioceptif 38
3.4 Agir 40
3.4.1 Anatomie et fonctionnement des muscles 40
3.4.2 Modélisation 42
3.4.3 Propriétés 43
3.4.4 Comportement 44
3.4.5 Ordres de grandeur 47
3.5 Contraintes 47
3.5.1 Redondances géométriques 47
3.5.2 Redondances cinématiques 48
3.5.3 Redondances dynamiques 49
3.6 Invariants du mouvement 49
3.6.1 Loi de Fitt 49
3.6.2 Loi de la puissance deux tiers 50
3.7 Conclusion 50

3.1 Introduction

Notre objectif est de décrire de manière succincte les différents récepteurs sensoriels et actionneurs dont le système nerveux central dispose, en lien avec la tâche de conduite. Nous insisterons entre autre sur les limitations physiologiques de chacun. Il est en effet primordial de mettre en lumière l'impact des performances des différents récepteurs sensoriels et du système neuromusculaire sur les capacités globales des conducteurs. C'est aussi parce que les mécanismes mis en place lors de la tâche de conduite sont intrinsèquement liés à ces caractéristiques sensorimotrices que nous nous y attarderons.

3.2 Le système nerveux central

Le système nerveux est composé du cerveau, de la mœlle épinière et des nerfs dont les fonctions peuvent être regroupées en deux structures. Le système nerveux central (SNC), regroupant le cerveau et la mœlle épinière est assimilable à un centre de commande alors que le système nerveux périphérique permet, au travers du vaste réseau que forment les nerfs, de véhiculer les information ascendantes et descendantes. Au sein de ce second système, on distingue le système nerveux somatique et végétatif. Le système nerveux somatique permet l'interconnexion entre le système nerveux central, les différents récepteurs sensoriels ainsi que les muscles. Le système nerveux végétatif, principalement relié à l'hypothalamus permet la régulation des fonctions vitales de l'organisme comme la respiration, la circulation sanguine etc.

Les mouvements volontaires, de précision trouvent leur naissance dans les structures supérieures (cortex moteur, etc.) du système nerveux central alors que les mouvements réflexes, automatiques sont produits en particulier au niveau de la mœlle épinière. Les mouvements lents tels que la poursuite d'une cible nécessitent une rétro-action pour leur contrôle et leur correction. Au contraire, les mouvements rapides ou balistiques (de quelques dixièmes de secondes à quelques secondes) ne peuvent être corrigés une fois leur exécution démarrée. L'arrêt de ces mouvements est programmé avant même le démarrage de l'action motrice et ne dépend pas de réafférences somesthésiques. Ainsi nous distinguons différents types de contrôle selon la vitesse du mouvement :

- contrôle en boucle ouverte pour les mouvements rapides,
- contrôle en boucle fermée pour les mouvements lents.

Le traitement des informations (retours sensoriels, etc.) ne peut être instantané si bien qu'il y a une durée minimum à la correction des mouvements. Le cortex moteur est la région où sont élaborés les ordres moteurs, à destination des membres. Cette partie se charge d'implémenter la réalisation précise des

commandes motrices en direction des motoneurones (voire figure 3.1). On y distingue :

- l'aire prémotrice (ou aire 4), responsable en partie du guidage des mouvements ainsi que de l'intégration sensorielle,
- l'aire motrice supplémentaire (ou aire 6), prenant en charge les mouvements complexes et de coordination manuelle.

Le cortex prémoteur est la partie du lobe frontal du cerveau située en avant des régions motrices. Son rôle est de décider, planifier et d'organiser le mouvement. On y trouve en particulier les neurones miroirs. Ce type de neurones fût initialement identifié chez le singe. Ils présentent la particularité d'émettre des potentiels d'action à la fois lors de la réalisation d'un mouvement ainsi que lors de l'observation de la réalisation de ce même mouvement par un autre individu. Toutefois, d'autres structures présentent un rôle primordial dans la genèse de toute action, il s'agit des ganglions de la base et du cervelet.

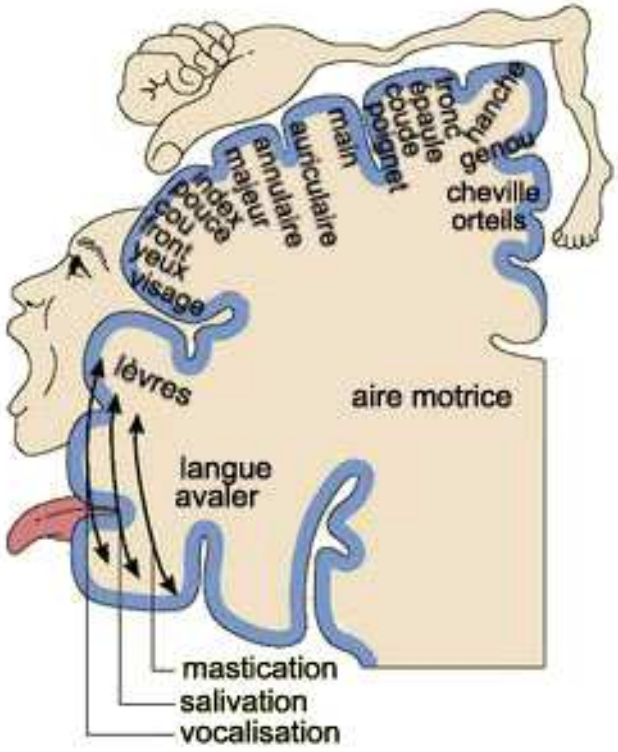


FIGURE 3.1 – Cartographie fonctionnelle du cortex moteur, d'après McGill, 2008. La répartition n'est pas uniforme : les parties du corps offrant des mouvement complexes ou nécessitant une dextérité importante occupent ainsi la majorité de la surface du cortex moteur.

Les ganglions de la base regroupent le noyau caudé, le putamen, le globus pallidus et le noyau sous-thalamique. Ils reçoivent des informations provenant de larges régions corticales, qui sont après traitements transmises à l'aire motrice supplémentaire via le thalamus. Les ganglions de la base semblent jouer un rôle dans la sélection des actions à réaliser en facilitant l'action de l'aire motrice supplémentaire qui reçoit des informations déjà traitées.

Le cervelet reçoit des informations en provenance du cortex moteur qui, au travers des copies efférentes est informé des actions qui vont être réalisées. Mais cette structure est aussi connectée au cortex sensoriel. Ainsi le cervelet dispose des informations nécessaires pour corriger les actions motrices au cours de leur réalisation. Le cervelet est par ailleurs en mesure de compter le temps ce qui lui confère la capacité de coordonner, séquencer ses actions. Il assure enfin l'apprentissage de nouveaux mouvements

3.3 Percevoir

3.3.1 Le système visuel

Anatomie

Le rôle de l'œil est de traduire les informations lumineuses qu'il reçoit de l'environnement en une information compatible avec le système nerveux. Les rayons lumineux traversent la cornée puis le cristallin qui les concentre sur la rétine qui à son tour, les transforme en activité nerveuse. Tel le diaphragme d'un appareil photographique, l'iris permet de moduler la quantité de lumière qui traversera le cristallin. La rétine est composée de deux types de récepteurs : les cônes et les bâtonnets. Les cônes permettent le discernement de détails, des couleurs (sensibles soit au bleu, rouge ou vert) et qui sont sensibles à des sources lumineuses intenses. Les bâtonnets sont quant à eux adaptés à de faibles luminosités pour la vision nocturne. La fovéa, située au centre de la rétine, présente une concentration élevée de cônes et est la zone où l'acuité visuelle est à son paroxysme. Les cônes et les bâtonnets présentent le premier niveau de traitement de l'information lumineuse. La rétine est composée de plusieurs couches de cellules : les cellules horizontales, bipolaires, amacrines et enfin ganglionnaires (voire figure 3.2). Ces dernières donnent naissance au nerf optique. Toutefois ces dernières présentent des différences dans leurs réponses à une excitation lumineuse. Certaines sont sensibles aux variations d'un stimulus alors que d'autres réagissent lorsque celui-ci est constant.

Le nerf optique véhicule les informations détectées par environs 135 millions

de cônes et de bâtonnets vers le cortex au travers des ses quelques 1.5 millions de cellules ganglionnaires qui le composent. Les nerfs optiques de chaque œil se rejoignent au niveau du chiasma optique pour se re-séparer par la suite (voir figure 3.3). Une partie des fibres nerveuses se dirige vers les colliculi supérieurs (impliqués en particulier dans les mouvements oculomoteurs pour la perception ainsi que l'accommodation) tandis que l'autre transite par le corps genouillé latéral avant d'atteindre les aires visuelles, situées à l'arrière des lobes occipitaux. La première zone impliquée est l'aire corticale V1 aussi appelée aire corticale primaire. Puis l'information rayonne dans les aires visuelles suivantes (V2, V3, V4, V5, *Middle Temporal*, *Medial Superior Temporal*, etc.) (Paillé, 2005). Comme le rappelle (McGill, 2008), il est proposé une séparation fonc-

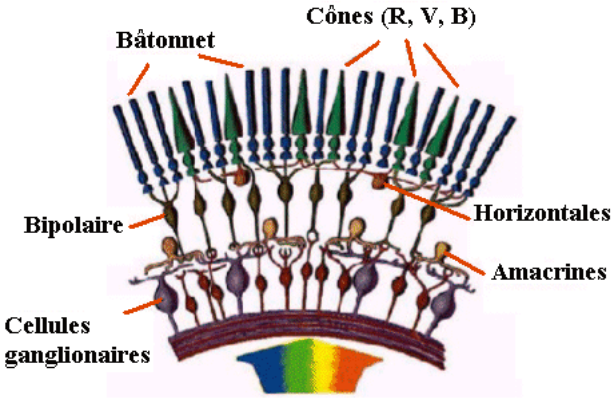


FIGURE 3.2 – Structure de la rétine, d'après Denis, 2008

tionnelle du système visuel : la voie dorsale positionnant les objets dans l'espace et la voie ventrale les identifiant. Ainsi la principale fonction de la voie dorsale est le guidage (semblerait-il inconscient) des actions dirigées vers les objets de l'environnement visuel. Cette voie est orientée action tandis que la voie ventrale semble être impliquée dans la formation des représentations et donc de la détection de ces objets. Cette voie serait quant à elle consciente.

Caractéristiques

Le temps de réaction à un stimulus visuel dépend de la tâche qui est demandée au sujet. Il augmente avec le nombre de stimulus présentés et de réponses proposées. Par exemple, certains travaux (Evans et Treisman, 2005) suggèrent que la détection d'objets dans un environnement est plus rapide que leur identification et localisation dans l'espace. Toutefois, ce temps de réaction est de l'ordre de 180ms (Bonnet, 2007, Evans et Treisman, 2005). La figure 3.4 présente le séquençage des différents traitements impliqués dans une tâche de reconnaissance d'objets.

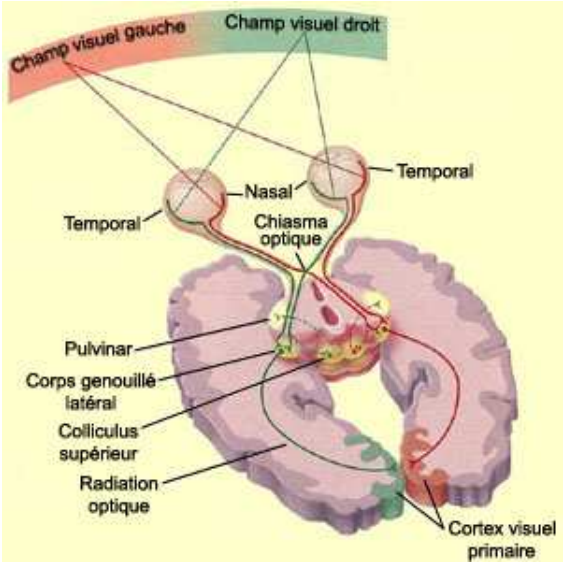


FIGURE 3.3 – D'après McGill, 2008. Anatomie du système visuel.

3.3.2 Le système vestibulaire

Anatomie

Situé au niveau de l'oreille interne, le système vestibulaire est l'élément de base dans la détection de mouvements inertiels de la tête. Il est constitué du nerf vestibulocochléaire, de ses noyaux encéphaliques et du labyrinthe postérieur. Ce dernier est composé des canaux semi-circulaires, de l'utricule et du saccule (voir figure 3.5). Les canaux circulaires sont au nombre de trois (latéral, postérieur et antérieur). Leur disposition autorise la détection d'orientations selon n'importe quel axe. Ces canaux ont une forme de tore, ils sont creux et contiennent un liquide, l'endolymphe. Lors d'une rotation, l'endolymphe se déplace dans les canaux semi-circulaires, déplacement détecté par les cils des cellules cillées qui recouvrent la paroi intérieure de ces canaux. Les otolithes contiennent des concrétions cristallines, les otochonia, qui reposent sur des cellules cillées. Lors d'accélérations linéaires, les otochonias se déplacent par rapport au reste du corps (de l'ordre de quelques micromètres) et stimulent les cils sur lesquels ils reposent, ce qui rend leur mouvement détectable. De part l'orientation du saccule et de l'urticule, il est alors possible de mesurer des accélérations linéaires dans le plan horizontal (orthogonal à l'axe de la gravité) et vertical (colinéaire à l'axe de la gravité). Toutefois, il n'est pas possible de discriminer à partir du seul signal otolithique une accélération linéaire d'une inclinaison de la tête (par rapport à l'axe de pesanteur). Cette ambiguïté est particulièrement exploitée au sein des simulateurs dynamiques de vol ou de conduite. Ces dispositifs ayant

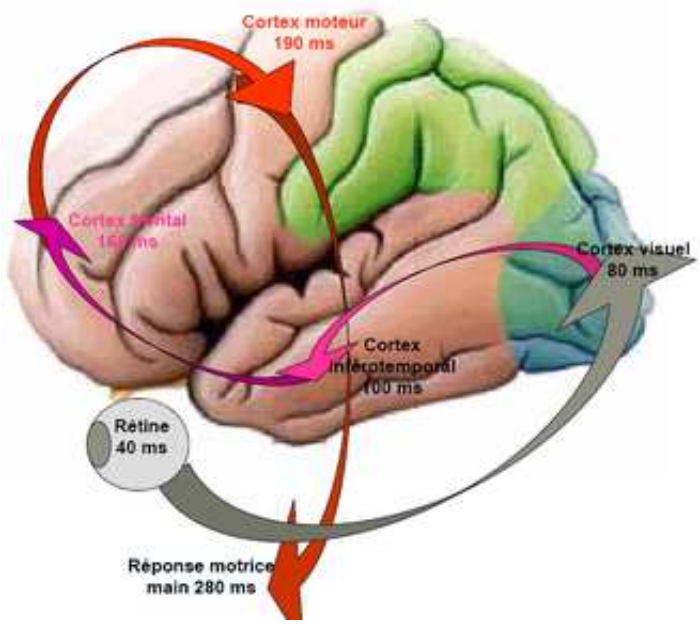


FIGURE 3.4 – D'après Bonnet, 2007 et Thorpe et al., 2001. Séquençage des différents traitements impliqués dans une tâche de reconnaissance visuelle d'objets.

des déplacements limités dans l'espace, les sensations d'accélérations et de décélérations linéaires soutenues sont en fait le résultat d'inclinaisons du pilote ou du conducteur.

Caractéristiques

La réponse des canaux diffère selon la fréquence de la stimulation. Pour des rotations de fréquences inférieures à 5Hz, l'information délivrée correspond à la vitesse de rotation mais pour des fréquences plus élevées, il s'agit de l'accélération angulaire. Ainsi la dynamique des canaux soumis à une vitesse de rotation de la tête peut être modélisée par un filtre passe haut du premier ordre avec une constante de temps de l'ordre de quelques secondes. La réponse des otolithes à des accélérations linéaires peut être décrite par un système masse-ressort-amortisseur avec là aussi une constante de temps de plusieurs secondes.

Le système vestibulaire est essentiel au maintien de l'équilibre et de la locomotion. Il joue aussi un rôle majeur dans la stabilisation du regard. Lorsque nous nous déplaçons en fixant un objet par exemple, notre mouvement propre est compensé afin que l'image de cet objet soit nette : c'est le réflexe vestibulo-oculaire. Par ailleurs, des interactions existent entre les otolithes et les canaux semi-circulaires, permettant dans le cas d'inclinaisons rapides, de percevoir ef-

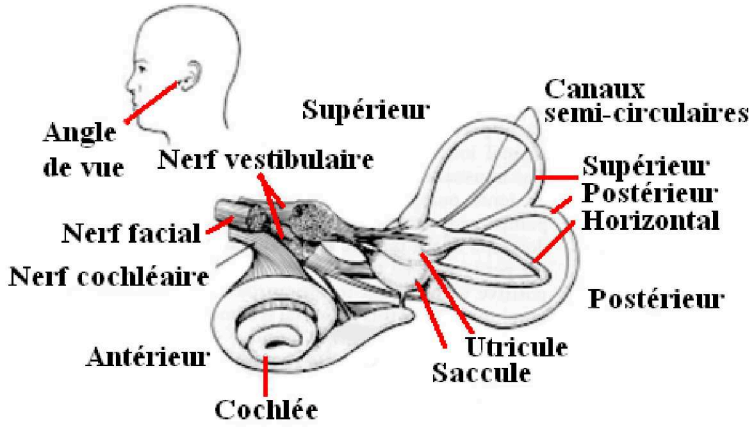


FIGURE 3.5 – D'après Blouin, 2004. L'appareil vestibulaire est permet entre autre la détection de rotations via les canaux semi-circulaires et d'accélérations linéaires au niveau des otolithes.

fectivement une rotation et non une translation.

Les seuils de détection de mouvements par le système vestibulo-oculaire sont de l'ordre de $0.005g$ pour des accélérations linéaires et de $0.1deg/s^2$ pour des accélérations angulaires (MacAdam, 2003). Toutefois ces valeurs sont variables, dépendant en particulier de l'amplitude, de la durée de stimulation.

3.3.3 Le système proprioceptif

Anatomie

Nous décrivons ici les récepteurs liés à la proprioception, c'est-à-dire à la fois le sens du toucher (tactile) et de la position et le mouvement des membres (kinesthésie). La peau ou plutôt les couches qui la composent (épiderme, derme et hypoderme) comporte des mécanorécepteurs dont le nombre peut atteindre 17000 unités environ pour la main seulement. Leur répartition est inégale : leur densité surfacique peut atteindre les 2500 unités/cm^2 aux extrémités des doigts. Les principaux récepteurs cutanés sont (voire figure 3.6) :

- les corpuscules de Pacini, sensibles aux vibrations de faible amplitude et de fréquence élevée (Iggo et Andres, 1982). Ainsi ils peuvent détecter des vibrations d'une amplitude d'1μm et de fréquence de 250 à 300Hz,
- les corpuscules de Ruffini, de résolution moyenne, ils sont sensibles aux basses fréquences (jusqu'à 10Hz) et renseignent en particulier sur la direction et l'intensité des forces statiques,

– les corpuscules de Meissner sont plus petits que les corpuscules de Pacini (rapport de 1 à 10) et sont généralement présents aux extrémités des doigts. Leur bande passante est de 20 à 50Hz ce qui leur autorise la détéction des variations de contacts telles que les arêtes des objets,
– les disques de Merkel présentent une résolution élevée et une bande passante s'étandant jusqu' à 10Hz. A l'instar des corpuscules de Meissner, ils détectent les discontinuités et aussi les textures.

Dans les articulations se trouvent aussi des récepteurs permettant d'informer le système nerveux central de la position angulaire et de la pression interne de chacune d'entre elles :

– les corpuscules de Ruffini renseignent sur la position et le mouvement de l'articulation. Ils sont situés dans la partie superficielle de la capsule articulaire et répartis généralement aux positions angulaires extrêmes de l'articulation,
– les corpuscules de Vater-Pacini détectent les accélérations angulaires des articulations mais sont insensibles aux positions de celles-ci,
– les organes de Golgi-Mazzoni sont situés à la fois dans la partie profonde de la capsule articulaire et dans les ligaments. Ils sont sensibles respectivement à la pression interne de l'articulation et aux vibrations.

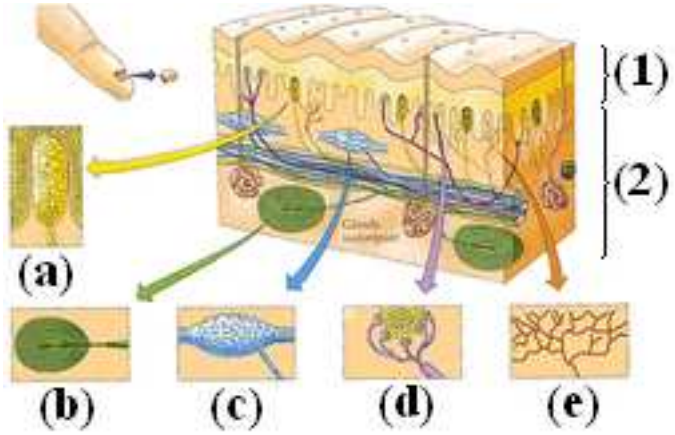


FIGURE 3.6 – D'après Guillaud, 2006. Vue en coupe de la peau : l'épiderme (1) et le derme (2). Les corpuscules de Meissner (a), de Pacini (b), de Ruffini (c), les disques de Merkel (d) et les terminaisons nerveuses libres (e)

Les muscles sont composées de fibres musculaires elles-mêmes composées en partie de fibres sensitives (de type Ia et II). Ces fibres sont capables de détecter des variations de longueur des muscles aussi bien lors d'un mouvement volontaire que lors d'une stimulation externe. Un second type de récepteur est présent dans la fibre musculaire : l'organe tendineux de Golgi dont le seuil d'ex-

citation en contraction active est de quelques dizaines de μm alors qu'il est de l'ordre du Newton lors d'un étirement passif.

Caractéristiques

Les mécanorécepteurs impliqués dans la proprioception ont des temps de réaction différents dépendant en particulier de l'intensité, de la localisation et de la durée du stimulus. Ainsi le seuil de perception tactile au niveau du visage est l'ordre de quelques milligrammes alors qu'il peut atteindre plusieurs centaines de milligrammes au niveau d'un orteil. Les voies sensorielles empruntées pour véhiculer les informations proprioceptives sont tout aussi variables : plus le diamètre d'une fibre nerveuse est important, plus la vitesse de transmission sera élevée. Cette vitesse de conduction s'étale sur une large de gamme de valeurs, allant de 0.5m/s à 120 m/s.
Par ailleurs, il a été mesuré que le temps de réponse à une stimulation tactile simple était de l'ordre de 140ms (Teichner, 1954). Bhushan et Shadmehr proposent dans (Bhushan et Shadmehr, 1999) que l'information proprioceptive relative à l'état des articulations du bras (position et vitesse angulaires) ne sont pas disponibles immédiatement auprès du système nerveux central mais après un retard de l'ordre de 120ms.

3.4 Agir

Bien que le système nerveux central possède une grande variété de récepteurs sensoriels, le muscle est le principal élément du système neuro-musculaire permettant de produire un travail mécanique et donc de mettre en mouvement le corps. Nous décrivons alors certaines propriétés ainsi que le fonctionnement de celui-ci.

3.4.1 Anatomie et fonctionnement des muscles

Les muscles sont constitués de fibres musculaires renfermant de nombreuses myofibrilles. Les myofibrilles sont constituées d'éléments cylindriques assemblés de manière longitudinale. Elles sont à leur tour composées principalement de deux types de filaments différentiables par leur couleur : les filaments de myosine (épais, de 10 à 15 nm de diamètre) et les filaments d'actine (fins, environ 5 nm de diamètre). Les myofibrilles présentent alors une altérnance de régions composées seulement de filaments d'actines (zones claires) d'une part et les sarcomères (ensembles de filamements d'actine et de myosine intercalés) d'autre part (zones sombres). Ce sont les sacromères qui confèrent au muscle ses capacités de contraction. En effet, lors d'une contraction d'un muscles, les zones claires conservent une taille constante alors que les zones sombres rétrécissent.

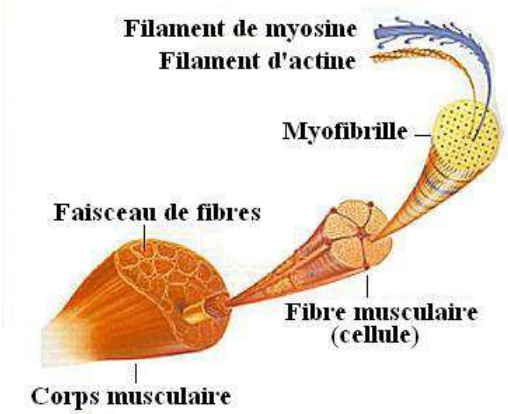


FIGURE 3.7 – Anatomie du muscle

La manière dont les zones sombres se contractent est décrite par la théorie des ponts glissants (Huxley, 1957) :

1. en présence de calcium, les filaments de myosine sont réliés par de petites têtes mobiles aux filaments d'actine,
2. suite à la stimulation du muscle par les nerfs, les têtes mobiles de myosine se séparent du filament d'actine,
3. les têtes mobiles de myosine se déplient par effet ressort,
4. les têtes mobiles se fixent aux filaments d'actine, puis se replient, provoquant ainsi le déplacement des filaments d'actine.

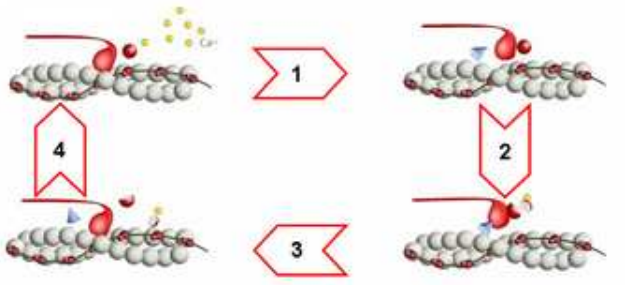


FIGURE 3.8 – Mécanisme des ponts glissants.

L'excitation des muscles est assurée par les neurones moteurs (motoneurones). Un motoneurone contrôle un nombre limité de fibres musculaires pouvant varier de quelques unités à plusieurs milliers. L'ensemble constitué d'un motoneurone, de son axone et des fibres musculaires qu'il innerve est appelé unité motrice. La réponse d'une fibre musculaire est de type tout-ou-rien dans le sens où si

l'intensité de l'excitation dépasse un certain seuil, la tension de la fibre musculaire est maximale. Si l'intensité augmente, d'autres fibres musculaires sont recrutées. Les unités motrices seraient recrutées selon leur taille, des plus petites aux plus grandes, autorisant une gradation fine de la tension musculaire pour les faibles efforts et plus massive et plus grossière pour les niveaux d'efforts élevés. Cette production d'effort sous excitation décrit le caractére actif du muscle. Les éléments non contractiles sont aussi source d'efforts dits cette fois-ci passifs. Nous distinguons parmi les unités motrices trois types de fibres musculaires :

- en premier sont recrutées les fibres de type I dont le seuil d'activation est le plus bas,
- puis c'est au tour des fibres de type IIa,
- enfin ce sont les fibres de type IIb dont le seuil d'activation est le plus haut.

3.4.2 Modélisation

Dans une première approche, le comportement des muscles est souvent assimilé à celui d'un ressort, associé selon les cas avec un élément de type amortisseur.

L'approche phénoménologique - Le modèle de Hill

Le modèle de Hill (Hill, 1938) repose sur trois composants (voir figure 3.9)permettant de caractériser trois propriétés importantes des muscles :

- un élément contractile (CE). Une fois activé, il génère une force dépendant en particulier de la longueur du muscle ainsi que de sa vitesse de contraction (raccourcissement). Inactif, il n'oppose aucune résistance à l'étirement du muscle,
- un élément élastique série (SE). Il traduit l'observation de la chute rapide de tension au niveau du muscle lorsque celui-ci, activé en conditions isométriques (longueur constante) subit un raccourcissement bref,
- un élément élastique parallèle (PE). Ce dernier élément retranscrit la force générée par le muscle lorsque celui-ci, non activé est étiré.

L'approche structurelle - Le modèle de Huxley

Le modèle de Huxley (Huxley, 1957) est lui aussi composé de trois éléments, similaires dans leur action à ceux du modèle de Hill. Le composant contractile décrit la génération de force selon la théorie des ponts entre les filaments d'actine et de myosine. L'élément élastique en série se voit divisé en un composant passif (il s'agit essentiellement des structures tendineuses) et un composant actif, localisé au niveau des ponts actine-myosine. Enfin l'élément élastique paral-

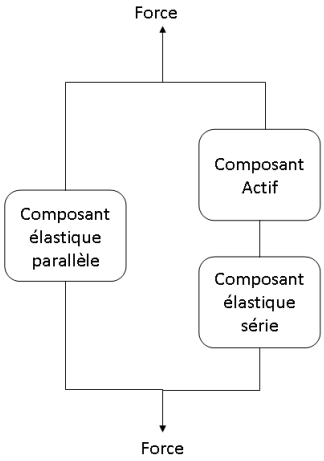


FIGURE 3.9 – Forme générale du modèle de Hill. Les composants élastiques peuvent intégrer les propriétés visqueuses des muscles.

lèle décrit les caractéristiques du tissu conjonctif et du sarcolemme (enveloppe excitable des fibres musculaires).

3.4.3 Propriétés

La force générée par une fibre musculaire dépend de sa longueur (Hill, 1938). Elle est le résultat du comportement conjoint des éléments actifs (ponts de myosine-actine) et passifs. La relation effort-longueur peut être alors établie pour chacun de ces comportements. En mode passif, la fibre musculaire est étirée et la force alors produite est mesurée. Dans cette condition, le muscle n'est soumis à aucune autre forme d'excitation afin de ne pas faire intervenir ses composants actifs. Un effort n'est mesuré que lorsque la fibre musculaire est étirée au delà d'une valeur dite de référence. Il est à noter que la vitesse de déformation de la fibre musculaire induit un phénomène d'hystérésis dans la production d'effort aussi bien lors de l'étirement que lors du relâchement qui s'en suit. En mode actif, la fibre musculaire est soumise à des stimulations tétaniques en conditions isométriques (extrémités de la fibre musculaire fixées afin de maintenir sa longueur constante).

La relation force-longueur prend alors une forme de parabole inversée centrée autour de la longueur de référence énoncée ci-dessus. (voir figure 3.10). Par ailleurs, la vitesse de contraction ou d'allongement du muscle est liée à l'effort appliqué à ses extrémités. L'obtention de la relation force-vitesse est obtenue par stimulation isotonique de la fibre musculaire tout en étant soumise à des charges (poids) variables. Il est alors observé que la force produite par la

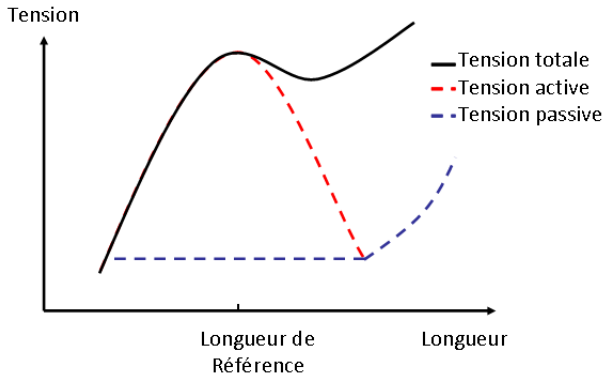


FIGURE 3.10 – Relation force-longueur d'une fibre musculaire, composantes actives et passives de la tension générée. En mode passif, la fibre musculaire est étirée et n'est soumise à aucune autre forme d'excitation. L'effort produit par cette dernière augmente avec la longueur d'étirement. En mode actif (stimulations par les motoneurones), la fibre produit un effort en forme de parabole inversée où le maximum est atteint lorsque la longueur de celle-ci coïncide avec la longueur de référence.

fibre musculaire diminue lorsque celle-ci se contracte et augmente (jusqu'à la destruction des ponts de myosine-actine) quand celle-ci est étirée.

L'évaluation de la force générée par un muscle lors de la réalisation de mouvement quelconque s'avère complexe. La force produite par une fibre musculaire soumise à un niveau d'activation maximal se trouve à l'intersection des courbes force-longueur et force-vitesse (voir figure 3.12). Si les modèles de Hill ou de Huxley s'avèrent appropriés pour décrire le comportement de muscles isolés, leur intégration dans un modèle biomécanique global d'un membre comme le bras par exemple soulève certaines difficultés. Le nombre de muscles impliqués dans un mouvement peut s'avérer élevé, la main par exemple présente pas moins de 42 muscles pour assurer le mouvement des doigts et du poignet (Pouliquen, 2006). Le pilotage de ces actionneurs par leur longueur d'étirement (et la vitesse d'évolution de celle-ci) implique alors de disposer de modèles inverses du comportement de ces muscles.

3.4.4 Comportement

Recrutement

La force totale délivrée par un muscle résulte de recrutements à la fois de type temporel et spatial des unités motrices. Le recrutement dit temporel est lié à la fréquence d'activation d'une unité motrice : plus celle-ci sera élevée, plus la contraction des fibres musculaires sera importante. Cela est illustré à la figure

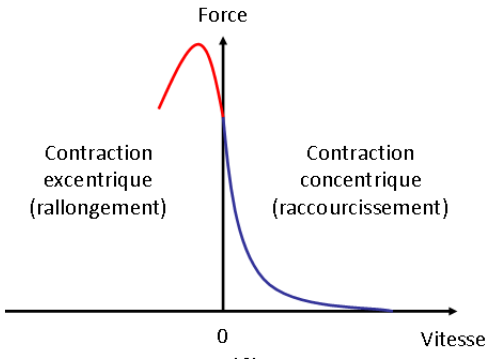


FIGURE 3.11 – Relation force-vitesse d'une fibre musculaire. La force produite par la fibre musculaire lorsqu'elle se contracte diminue avec l'augmentation de la vitesse de ce rétrécissement. Si la fibre est cette fois étirée, elle produit un effort qui atteint un maximum pour une vitesse d'allongement caractéristique propre.

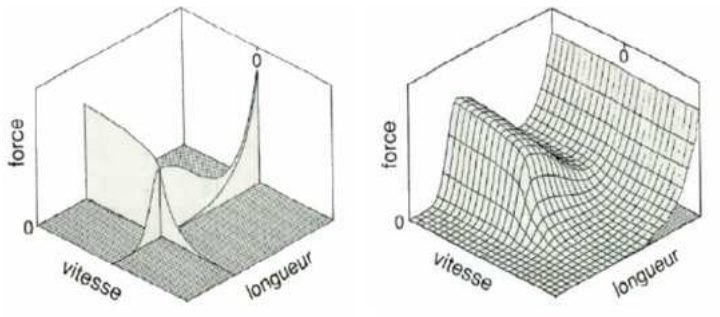


FIGURE 3.12 – D'après Cheze, 2005. Les relations force-longueur et force-vitesse permettent de déterminer la force totale produite par une fibre musculaire sous excitation maximale.

3.13. Mais le recrutement peut aussi être spatial. Nous avons vu que le muscle est un ensemble hétérogène de fibres musculaires aux caractéristiques variées. Un ordonnancement de ce type de recrutement proposé est de recourir dans un premier temps aux fibres musculaires lentes puis d'activer progressivement les fibres plus rapides (voir figure 3.14). Il s'agit du *Size Principle* formulé par Henneman et ses collègues (Henneman et Olson, 1965, Henneman et al., 1965b et Henneman et al., 1965a).

Fonctionnement en synergie

Le muscle doit croiser une articulation pour que la force qu'il génère puisse la mettre en mouvement. Comme il a été décrit précédemment, il ne peut

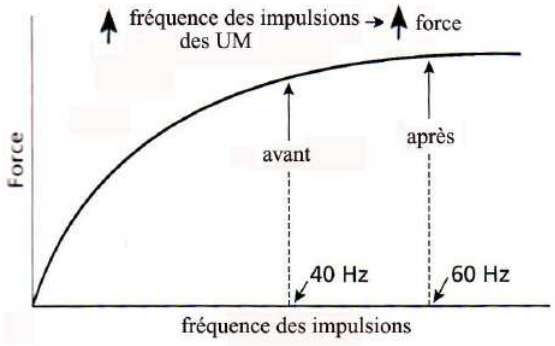


FIGURE 3.13 – D'après Cometti, 2008. Le recrutement temporel d'une unité motrice est lié à sa fréquence d'excitation. Ici la figure montre l'effet de l'entrainement musculaire qui a pour conséquence d'augmenter la capacité d'excitation à fréquence élevée de l'unité motrice.

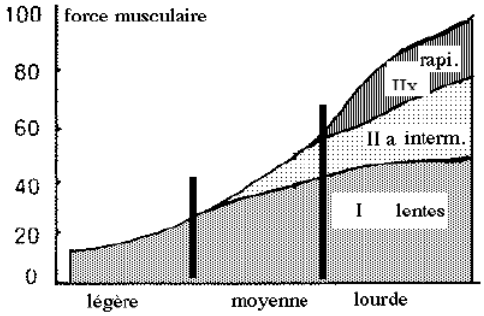


FIGURE 3.14 – D'après Cometti, 2008. Le recrutement spatial fait d'abord appel aux fibres musculaires lentes puis à celles plus rapides selon la nature du mouvement.

que se contracter et donc induire un mouvement de l'articulation que dans un seul sens. Le muscle ne fonctionne donc pas de manière isolée mais en synergie avec d'autres muscles capables en particulier d'induire un mouvement inverse de l'articulation en question. Les muscles agissant sur une même articulation mais avec des effets opposés sur son mouvement forment un couple agoniste/antagoniste. Nous distinguons deux types de synergie (Cheze, 2005). La synergie de mouvement fait appel aux muscles antagonistes de manière simultanée ou successive afin de produire un certain mouvement de l'articulation. La synergie de stabilisation permet comme son nom l'indique de stabiliser une articulation, de maintenir sa position. Pour ce faire, les muscles antagonistes sont activés simultanément, c'est la cocontraction.

Une caractéristique émergente

De par leurs caractéristiques viscoélastiques ainsi que leurs comportements par paires, les muscles antagonistes confèrent aux articulations et donc aux membres une raideur ainsi qu'une viscosité globales. Dans un contexte de co-contraction, chaque muscle exerce une force de rappel, dans des sens opposés. Lorsqu'une articulation se trouve dans une position angulaire désirée, celle-ci est alors dans une position d'équilibre car la somme des forces excercées par les muscles se compensent. Lorsque cette articulation voit sa position angulaire changée par une quelconque perturbation, les forces générées par les muscles tendent à ramener l'articulation dans sa position initiale. C'est ce qu'observent Mussa-Ivaldi et al (Mussa-Ivaldi et al., 1985) : leurs résultats suggèrent que le bras retrouve sa position initiale à la suite d'une perturbation extérieure, avec un comportement principalement de type élastique. De ces travaux découlera le concept d'impédance. Il s'agit alors de la capacité de résistance des membres face à des pertubations exterieures. Ces forces de résistance, opposées à celles perturbatrices dépendent à la fois des variations de position, vitesse et accélération induites. L'impédance apporte donc une stabilité aux membres aussi bien lorsque ces derniers sont immobiles ou en mouvements.

3.4.5 Ordres de grandeur

La raideur ainsi que la viscosité apparentes des muscles peuvent varier en fonction de la posture des membres (Gomi et Kawato, 1996, Gomi et Kawato, 1997). Le tableau 3.1 regroupe quelques ordres de grandeur issus de la littérature :

Source	Raideur en $N.m^{-1}$	Viscosité en $N.s.m^{-1}$
Dingwell et al., 2002	de 100 à 500	de 5 à 25
Mussa-Ivaldi et al., 1985	de 68 à 641	–

TABLE 3.1 – Ordres de grandeur de raideur et viscosité apparentes des muscles dans différentes postures (Dingwell et al., 2002, Mussa-Ivaldi et al., 1985).

3.5 Contraintes

3.5.1 Redondances géométriques

Le squelette dispose d'un nombre important d'articulations, chacune pouvant présenter un ou plusieurs degrés de liberté. Le genou ne permet de rotation qu'autour d'un seul axe, le coude en présente deux et la hanche en autorise

trois. Cela a pour conséquence d'offrir une immense variété de postures et une grande souplesse de configurations pour la réalisation d'un mouvement. Toutefois il est à noter qu'un nombre trop élevé de degrés de liberté peut être source de complications. Prenons par exemple un cas usuel de préhension d'un objet de l'environnement. Pour cela il est nécessaire d'amener la main à une certaine position, proche de cet objet puis de le saisir. La pose de la main dans l'espace est parfaitement définie par six coordonnées : trois sont nécessaires à repérer la position d'un de ses points (par exemple son centre de gravité) et trois autres permettent de définir son orientation dans l'espace (au travers des angles d'Euler par exemple). Or pour atteindre cette pose, le système nerveux central doit commander trois articulations : l'épaule qui présente trois degrés de liberté en rotation, le coude et le poignet qui en ont chacun deux. Avec un total de sept degrés de liberté pour le bras, il apparaît alors qu'un degré de liberté est de trop. La transformation de coordonnées entre l'espace articulaire et l'espace de travail ne peut être bijective : si à une unique configuration des articulations correspond bien une unique pose de l'organe terminal (ici la main), il n'en n'est pas de même pour la réciproque.

3.5.2 Redondances cinématiques

Conséquence directe de la redondance géométrique, la planification de la trajectoire d'un mouvement est confrontée à une infinité de solutions. Chacune des positions articulaires intermédiaires doit être atteignable ainsi que la transition de l'une à l'autre. Notons X le vecteur de coordonnées de la main dans l'espace de travail (cartésien) et q celui dans l'espace articulaire. La transformation de coordonnées permettant de passer de l'espace articulaire à l'espace de travail est noté T. Nous avons alors :

$$X = T(q) \tag{3.1}$$

Le jacobien de T noté J_T fournit la relation cinématique suivante

$$\frac{dX}{dt} = J_T(q).\frac{dq}{dt} \tag{3.2}$$

Le fait que le jacobien inverse puisse s'annuler ajoute une contrainte supplémentaire à la planification de la trajectoire du mouvement. Cette possibilité est bien connue des roboticiens car cela signifie que pour une vitesse nulle des articulations du robot, la vitesse de l'organe terminale peut ne pas l'être : le robot n'est plus contrôlé et les efforts produits par les actionneurs au niveau des articulations peuvent tendre vers l'infini. Il s'agit alors d'éviter lors de la génération de trajectoire que la matrice jacobienne ne soit singulière.

3.5.3 Redondances dynamiques

Les muscles sont les seuls actionneurs dont dispose le système nerveux central pour mettre en mouvement les articulations des membres concernés. Or les muscles sont composés de fibres de caractéristiques différentes et dont le recrutement varie selon que le mouvement est rapide ou lent. De plus, le fonctionnement synergique des muscles par couple agoniste-antagoniste permet, pour un même niveau de couple articulaire une infinité de tensions musculaires.

3.6 Invariants du mouvement

Les redondances ou aussi appelées abondances de degrés de liberté offrent un large éventail de possibilités lors de la planification et de la réalisation des mouvements. De plus la présence de bruits sur les signaux sensoriels et moteurs se révèle être une source de variabilité supplémentaire. Or les mouvements présentent sous certains aspects une répétabilité tant au niveau intra qu'inter-sujet. De ce constat, des invariants du mouvement ont été expérimentalement identifiés. Nous présentons ci-dessous deux d'entre eux, la loi de Fitt (Fitts, 1954) et la loi de la puissance deux tiers (Lacquaniti et al., 1983). Ces invariants matérialisent les stratégies mises en place par le système nerveux central dans la sélection d'une solution particulière parmi l'infinité de celles disponibles. Enfin, la loi de la puissance deux tiers ainsi que la loi de Fitt se révèlent être des critères nécéssaires pour la validation de stratégies de planification de trajectoire du mouvement.

3.6.1 Loi de Fitt

La loi de Fitt (Fitts, 1954) décrit empiriquement le compromis observé entre vitesse d'exécution et précision du mouvement dans une tâche de pointage monodimensionnelle et pour des sujets novices (non entrainés). Une formulation possible de la loi de Fitt pour un mouvement selon une seule direction est décrite par l'équation 3.3. Le terme MT représente le temps nécessaire pour accomplir le mouvement, a est un offset et le paramètre b est relatif à la dynamique du système de pointage utilisé. D est la distance séparant le point de départ et la position de la cible, dont la largeur est W.

$$MT = a + b.ln(\frac{D}{W} + 1) \tag{3.3}$$

La loi de Fitt est couramment utilisée dans la conception d'interfaces homme-machine pour modéliser l'acte de pointage d'un utilisateur.

3.6.2 Loi de la puissance deux tiers

Lorsque nous écrivons ou dessinons des motifs tels que des ellipses, il a été observé que la vitesse de la main augmentait dans les zones rectilignes et diminuait dans celles où la courbure était croissante (Viviani et Flash, 1995). Cette relation entre vitesse curviligne et courbure de la trajectoire est appelée loi de la puissance deux tiers (voir equation 3.4 dans sa formulation originelle (Lacquaniti et al., 1983)).

$$\frac{V}{R} = K.C^{\frac{2}{3}} \tag{3.4}$$

Dans cette formulation, V représente la vitesse curviligne, R le rayon de courbure de la trajectoire (C la courbure associée) et K est un paramètre. Cette relation entre la vitesse du mouvement et la forme de la trajectoire ne s'avère par ailleurs pas cantonnée aux déplacements de la main mais aussi à celui du corps tout entier lors de la marche (Vieilledent et al., 2001). Il est proposé que cette relation soit mise en application par le système nerveux central lors de la planification de la trajectoire du mouvement désiré. Toutefois certains suggèrent (Gribble et Ostry, 1996) que cette caractéristique cinématique du mouvement puisse être en partie une conséquence des propriétés dynamiques des membres et en particulier des muscles (de par le comportement de type ressort).

3.7 Conclusion

Malgré ces contraintes, nous avons vu que la génération de mouvements chez l'homme présente des invariants, révélateurs de la mise en place de stratégies spécifiques. La mise en œuvre de ces dernières assure le lien entre la perception de l'environnement et la réalisation des actions et ce dans un but donné. La description de cette interaction porte le nom de contrôle sensorimoteur. Plusieurs questions se posent alors. En particulier, comment le système nerveux central gère cette multitude d'afférences sensorielles ? Comment en extrait-il les informations qui lui sont nécessaires au sein de signaux bruités et retardés ? Quels critères interviennent dans le choix des commandes motrices ? C'est ce que nous allons tenter de comprendre dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Les théories du contrôle sensorimoteur

Sommaire

4.1 Introduction 52
4.2 Les théories du point d'équilibre 52
4.2.1 Contrôle du point d'équilibre en boucle fermée . . 53
4.2.2 Contrôle du point d'équilibre en boucle ouverte . . 55
4.2.3 Un modèle synthétique 55
4.3 Les théories du contrôle optimal 56
4.3.1 Critère de la secousse minimale 57
4.3.2 Critère de la variation minimale de couple articulaire 57
4.3.3 Critère de la variance minimale 58
4.4 La théorie des modèles internes 60
4.4.1 Différents types de modèles internes 60
4.4.2 Différentes utilisations des modèles internes 62
4.4.3 Existence 65
4.5 Conclusion 66

4.1 Introduction

Le contrôle moteur décrit l'interaction entre un opérateur, son environnement et la tâche qu'il désire accomplir. Il existe principalement deux approches pour décrire ce lien qui unit la perception et l'action. La description dite "perception-action" postule que nos actions exploitent directement, au travers de nos récepteurs sensoriels, des informations issues de notre environnement, sans qu'elles ne subissent de traitements spécifiques. Par exemple, la décision de freiner pour un conducteur afin d'éviter la collision avec le véhicule le précédant serait directement liée à une quantité optique rendant compte de la vitesse d'agrandissement de l'image de ce véhicule sur la rétine du conducteur (Lee (1976)). Toutefois, la manipulation d'un système complexe requiert de l'opérateur qui le met en oeuvre la connaissance de ses caractéristiques dynamiques. Il est fréquemment suggéré que le contrôle du mouvement peut être segmenté en différentes étapes (voir figure 4.1). Une première question à laquelle doit répondre le contrôle sensorimoteur est d'identifier un objectif, une cible à atteindre. Cette étape fait appel en particulier à l'intégration des informations issues des différentes modalités sensorielles ainsi que l'intention, l'objectif du mouvement. A partir de la connaissance de l'état courant et de l'état désiré, intervient l'étape de la planification de la trajectoire du mouvement à réaliser. Enfin la trajectoire planifiée est réalisée par production de commandes motrices envoyées vers les effecteurs.

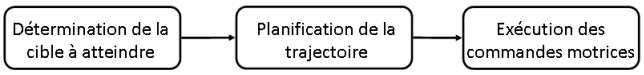


FIGURE 4.1 – Distinction du mouvement en tâches élémentaires

4.2 Les théories du point d'équilibre

Ces théories ont pour but de simplifier la génération de mouvement en évitant au système nerveux central de gérer les nombreux paramètres dynamiques des membres impliqués. Il a été en particulier observé qu'une même commande descendante peut correspondre à différents niveaux d'excitation des muscles. Cela est dû aux boucles réflexes comme le réflexe d'étirement par exemple. Ainsi un membre soumis à la même commande descendante peut se trouver dans différentes positions d'équilibre. Il est alors suggéré qu'entre deux positions stables, le point d'équilibre se déplace pour finalement coïncider avec la position finale. La tâche du système nerveux est alors de planifier les différents points d'équilibre définissant alors la trajectoire à suivre. Le passage de l'un à l'autre étant assimilé à un mouvement de relaxation. Si cette hypothèse

s'avère fédératrice, les approches qui tentent de décrire sa mise en oeuvre sont nombreuses et peuvent être regroupées en deux catégories : celles faisant l'hypothèse d'un contrôle du point d'équilibre en boucle ouverte et celles proposant un contrôle en boucle fermée.

4.2.1 Contrôle du point d'équilibre en boucle fermée

Le modèle de Merton

Le modèle de Merton (Merton, 1953), (Merton, 1972) repose sur le réflexe d'étirement. Ce réflexe fait intervenir les fibres musculaires et les fuseaux musculaires ainsi que leurs connexions neurales associées. Le fuseau musculaire est composé de fibres efférentes (γ et β) provenant des centres spinaux ainsi que de fibres afférentes (Ia et II) sources d'information pour ces centres (voir figure 4.2). La fibre musculaire est connectée aux centres par l'intermédiaire d'un motoneurone α dont l'excitation engendre la contraction de la fibre. En situation d'équilibre, l'élongation d'un muscle provoque celle des fuseaux neuromusculaires associés qui génèrent des potentiels d'action à destination des centres, véhiculés par les fibres Ia et II. Notons que ces potentiels d'action ont une fréquence proportionnelle à la fois à la longueur (codage statique) et à la vitesse (codage dynamique) de l'élongation. Il est alors observé une stimulation des fibres musculaires par les motoneurones α et donc une contraction du muscle, qui dans ses effets tend à s'opposer à l' élongation non volontaire. Ce réflexe qualifie aussi le tonus musculaire. Toutefois l'excitation isolée de la fibre musculaire par le motoneurone α ne permet pas la contraction des fuseaux musculaires. Ceux-ci le sont par l'intermédiaire du motoneurone γ ce qui autorise alors une contraction conjointe et cohérente des fibres et fuseaux musculaires lors de mouvements volontaires.

Gielen et Houk proposent un modèle non linéaire du réflexe d'étirement (Gielen et Houk, 1987). Toutefois Bhushan et Shadmehr (Bhushan et Shadmehr, 1999) en propose une linéarisation. Le modèle prend alors la forme d'un correcteur de type Proportionnel-Dérivé sur l'écart entre la longueur et la vitesse réelles et désirées des fibres musculaires. Le rapport entre la valeur de la viscosité du composant amortisseur et de la raideur du réflexe d'étirement est fixée à 0.1 (Gielen et Houk, 1987). Enfin ce réflexe n'a pas une action immédiate et ne génère une consigne de force qu'après quelques dizaines de millisecondes seulement : Bhushan et Shadmehr (Bhushan et Shadmehr, 1999) proposent 30ms, Doemges et Rack (Doemges et Rack, 1992) suggèrent 40ms. Merton fait alors la proposition d'un servomécanisme de régulation de la longueur du muscle par le reflexe d'étirement : la boucle γ. Il s'agit du déclenchement de contractions volontaires par commande des motoneurones γ. Une forte contraction des

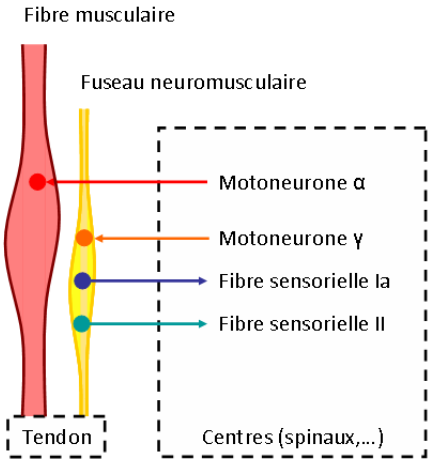


FIGURE 4.2 – Reflexe d'étirement, connexion effecteurs-centres-récepteurs

fuseaux neuromusculaires via les motoneurones γ ne permet pas de contracter le muscle directement. Mais leur variation de longueur et de vitesse est détectée par les fibres sensorielles Ia et II ce qui déclenche l'activation des motoneurones α et donc la contraction des fibres musculaires. Il est alors possible d'associer la position du point d'équilibre à la fréquence de décharge des motoneurones γ. Le réflexe d'étirement n'a pas une action immédiate, l'apport de raideur et viscosité apparentes au niveau des membres impliqués n'est seulement disponible qu'après quelques dizaines de millisecondes. Bhushan et Shadmerh proposent dans (Bhushan et Shadmehr, 1999) un retard de 30ms.

Le modèle de Feldman ou modèle λ

A l'instar de Merton, Feldman (Feldman, 1966) accorde un rôle important aux différentes boucles réflexes en y ajoutant le comportement synergique des muscles agonistes et antagonistes ainsi que le phénomène d'inhibition réciproque. La co-activation ainsi que l'inhibition des muscles antagonistes serait réalisée par deux voies descendantes, respectivement C et R. Elles affectent la longueur et la tension des fibres musculaires à l'équilibre, Feldamn propose alors qu'il est possible de modifier la commande de co-activation sans que cela n'affecte la position des articulations : la position d'équilibre peut ainsi être contrôlée indépendamment de la rigidité des articulations.

Le rôle des informations sensorielles périphériques est majeur dans cette approche du contrôle en boucle fermée du point d'équilibre. En supposant que ces informations ne soient pas disponibles, il apparaît que cette stratégie se retrouve dans l'incapacité de générer un quelconque mouvement. Or ce cas a

pu être testé expérimentalement chez des animaux dé-afférentés et a permis de réfuter l'hypothèse d'un contrôle de type boucle fermée (Polit et Bizzi, 1979).

4.2.2 Contrôle du point d'équilibre en boucle ouverte

Le modèle α

Ce modèle se fonde principalement sur la propriété émergente de viscoélasticité des muscles agonistes et antagonistes lorsqu'ils fonctionnent en synergie (co-contraction). Les couples articulaires produits par chacun des muscles se compensent en une certaine position appelée point d'équilibre. Supposons que chaque fibre musculaire impliquée présente un niveau de contraction constant et que l'articulation est écartée de sa position d'équilibre : l'élasticité des muscles aura pour effet de ramener l'articulation dans sa position initiale sans modification de la commande motrice. Contrairement au modèle de Feldman, le modèle α ne permet pas de contrôler séparément la rigidité de la posture et la position du point d'équilibre.

Le modèle de Bizzi et al.

Tout comme pour le modèle α, Bizzi et al. (Bizzi et al., 1982) insistent sur le rôle primordial des muscles dans le contrôle de la trajectoire des mouvements et la réaction à des évènements perturbateurs inattendus. Cette capacité de régulation émergerait des caractéristiques visco-élastiques des muscles. Ils ont en particulier observé l'importance des informations proprioceptives chez les singes dé-afférentés (privés d'information de type vestibulaire) lors de tâches de mouvements de tête : soumis à une charge inertielle, les singes dé-afférentés étaient capables d'atteindre la position cible. Toutefois il s'agit d'un demi succès car la cinématique des mouvements de têtes entre singes intacts et dé-afférentés était différente.

4.2.3 Un modèle synthétique

De ces différentes hypothèses de contrôle du point d'équilibre, McIntyre et Bizzi proposent un schéma unificateur (McIntyre et Bizzi, 1993) afin de surmonter les limitations de chacune d'entre elles. Ils proposent ainsi un modèle (voir figure 4.3) où :

- le point d'équilibre et la vitesse d'évolution sont commandés simultanément par la commande supraspinale,
- les propriétés visco-élastiques des membres permettent dans une certaine mesure de corriger d'eventuelles erreurs de trajectoires (dues à l'occurence d'une perturbation par exemple),

– les mécanismes réflexes asservissent les articulations à la trajectoire d'équilibre.

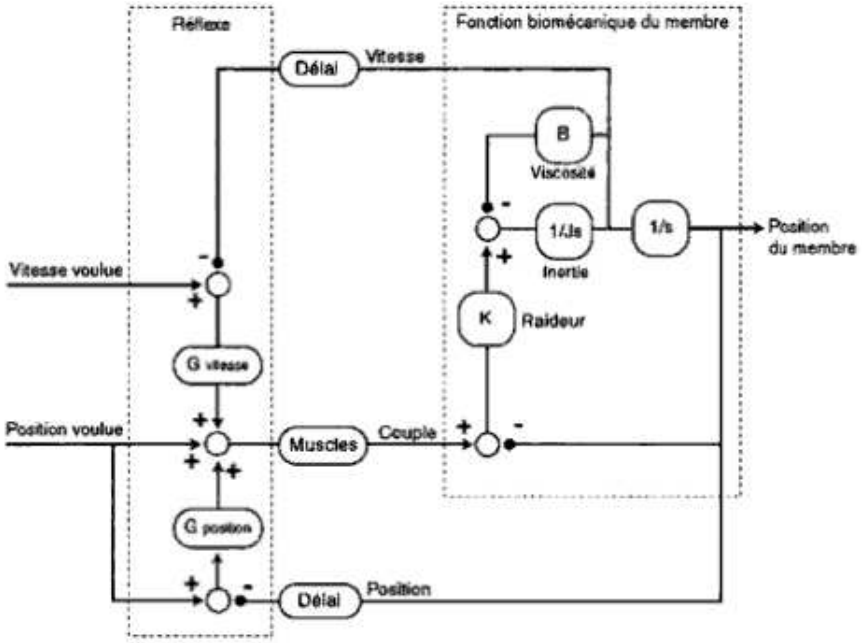


FIGURE 4.3 – Modèle de McIntyre et Bizzy présenté dans Didier, 2004. Unification des modèles α et λ. Intégration des caractéristiques visco-élastiques des muscles et de la double commande en position et en vitesse.

4.3 Les théories du contrôle optimal

Nous avons vu précédemment que notre problème était "mal posé". De ce fait, il existe une infinité de trajectoires pour passer d'une posture à une autre. Le cadre du contrôle optimal permet de contourner cette difficulté car il réside dans la détermination d'une trajectoire unique, minimisant un critère de coût global associé à la trajectoire du mouvement. C'est sur le choix de cette fonction de coût que les avis divergent. Nous présenterons alors succinctement différents coûts, fréquemment rencontrés dans la litérature. Notons que ces hypothétiques fonctions de coût sont généralement étudiées de manière expérimentale par l'intermédiaire de tâches de pointage et ce dans différentes conditions. Les sujets doivent atteindre de leurs mains différentes cibles successives. Pour ce type de tâches, les mouvements s'avèrent être stéréotypés. En particulier, les mouvements ont des trajectoires quasiment rectilignes entre deux cibles et le profil de vitesse présente une forme de cloche, sans variation discontinue de la vitesse et

de l'accélération.

4.3.1 Critère de la secousse minimale

Le critère est ici de rendre la trajectoire la plus gracieuse possible en minimisant les secousses tout au long de celle-ci. Ce critère très répandu a été proposé par Flash et Hogan (Flash et Hogan, 1985). Les secousses s'obtiennent par la dérivée temporelle de l'accélération du mouvement. Ainsi le critère de coût prend la forme de 4.1. La position de la main dans le plan est repérée par ses coordonnées cartésiennes (x, y). Le calcul de la trajectoire optimale est effectuée pour un mouvement de durée T sans étape intermédiaire .

$$C_{SecousseMinimale} = \frac{1}{2}\int_0^T (\frac{d^3x}{dt^3})^2 + (\frac{d^3y}{dt^3})^2 dt \tag{4.1}$$

En supposant la main immobile au début et à la fin du déplacement, il suffit pour déterminer la trajectoire optimale de connaître les coordonnées de la position initiale et finale ainsi que la durée du mouvement. Les trajectoires obtenues sont bien rectilignes dans le cartésien et présentent aussi un profil de vitesse en cloche. Cette forme de trajectoire s'avère de plus invariante en translation et en rotation, selon la durée et l'amplitude du mouvement. La détermination de cette trajectoire ne fait enfin appel à aucune représentation interne de la dynamique du bras. Ce critère permet de prédire des trajectoires similaires à celles observées expérimentalement (voir figure 4.4) pour des mouvements de pointage soit libres, soit contraints par le passage par des points intermédiaires ou avec des évitements d'obstacle. Par ailleurs cette hypothèse génère des trajectoires compatibles avec la relation de la loi de puissance deux tiers (Viviani et Flash, 1995).

4.3.2 Critère de la variation minimale de couple articulaire

Bien qu'un grand nombre de mouvements paraissent compatibles avec le critère de la secousse minimale, Uno et al (Uno et al., 1989) ont observé que certains mouvements, qu'ils soient de grande amplitude ou perturbés par l'application d'un effort extérieur sur la main présentaient des trajectoires curvilignes et non plus rectilignes, résultat incompatible avec le modèle de la secousse minimale. Ils proposent alors que la planification de la trajectoire du mouvement soit guidée par une minimisation des variations des couples articulaires. Soit un membre composé de N articulations. Notons M_i le couple au niveau de la i-ème articulation. Pour un mouvement d'une durée T le critère de coût

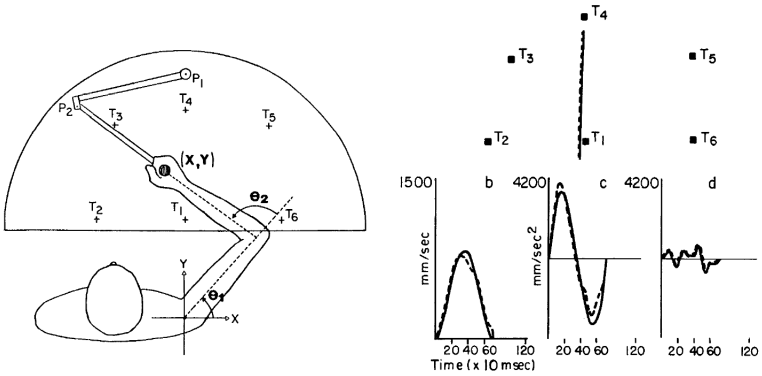


FIGURE 4.4 – Protocole expérimental de mesure de la trajectoire des mouvements des sujets lors d'une tâche de pointage libre (Flash et Hogan, 1985). Les courbes décrivent les mesures expérimentales en trait pointillé et les prédictions du modèle en trait gras : (a) trajectoires de la main, (b) profil de vitesse, (c) composante de l'accélération selon l'axe X et (d) composante de l'accélération selon l'axe Y.

prends alors la forme suivante :

$$C_{VariationCouple} = \frac{1}{2}\int_0^T \sum_{i=1}^{N} (\frac{dM_i}{dt})^2 dt \tag{4.2}$$

La mise en œuvre de cette approche requiert le calcul des couples articulaires et donc de disposer de connaissance sur des paramètres géométriques et dynamiques du corps (longueurs, masses, inerties, viscosités,etc.). La résolution de ce problème d'optimisation fournit alors directement les couples que devront générer chaque application.

4.3.3 Critère de la variance minimale

Les approches précédentes présentent l'avantage de fournir des résultats cohérents avec les observations expérimentales. Toutefois elles ne permettent pas d'expliquer comment le système nerveux central en est venu à de tels choix. Elles se révèlent par ailleurs complexes de part les quantités qu'elles manipulent (dérivée d'accélérations, de couples articulaires).

Harris et Wolpert (Harris et Wolpert, 1998) proposent une nouvelle hypothèse pour expliquer les mécanismes sous-jacents à la planification de trajectoire. Partant du constat que les signaux neuronaux contiennent du bruit, le système nerveux central aurait pour objectif de minimiser la variance de la position finale du mouvement à réaliser. Ce niveau de bruit serait dépendant

du niveau du signal. En d'autres termes, un mouvement trop rapide aurait un haut niveau de bruit et serait donc imprécis. Un mouvement trop précis serait par conséquent très lent. Ainsi le système nerveux central ferait face à un compromis vitesse-précision. La minimisation de la variance de la position finale serait modulée par la durée du mouvement ou de manière duale, cette durée du mouvement serait déterminée par le choix du niveau de précision du mouvement. Cette approche leur permet en particulier de retrouver certaines caractéristiques du mouvement lors de tâches de pointage : trajectoires rectilignes, profils de vitesse en cloche, lois de Fitt et de la puissance deux tiers (4.5). Enfin Harris et Wolpert suggèrent que ce type de stratégie ne serait pas plus complexe que celles de la secousse minimale ou de la variation minimale de couple articulaire.

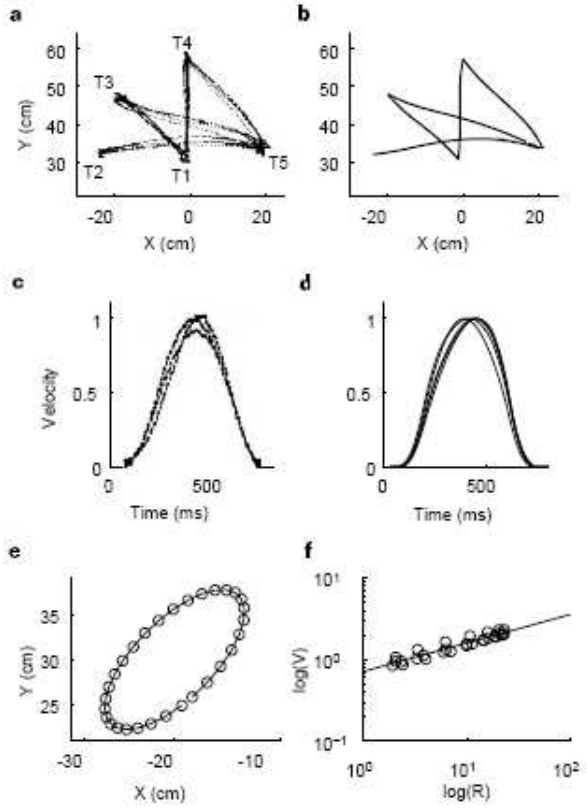


FIGURE 4.5 – Tâche de pointage, trajectoires de la main observées (a) et prédites par le principe de minimum de variance (b). Profils de vitesse observés (c) et prédits (d) lors du pointage de T1 à T3. Corrélation avec la loi de la puissance deux tiers (e) et (f). D'après Harris et Wolpert, 1998.

4.4 La théorie des modèles internes

Le cadre théorique des modèles internes apporte une réponse unifiée à de multiples étapes du contrôle sensorimoteur, de la planification de trajectoire à l'estimation de variables d'état en passant par l'apprentissage de nouvelles tâches par le système nerveux central. Le concept de modèle interne est de décrire diverses transformations sensorimotrices et dans une certaine mesure de reproduire le comportement de processus naturels (Jordan, 1995, Kawato et al., 1987).

4.4.1 Différents types de modèles internes

Miall et Wolpert proposent (Miall et Wolpert, 1996) une classification des modèles internes selon le type de transformations qu'ils effectuent.

Modèles directs de l'appareil sensorimoteur

Une première classe de modèle concerne la description de manière causale de l'appareil sensorimoteur (Jordan et Rumelhart, 1992) et permet de fournir au système nerveux central une prédiction d'un mouvement désiré. Pour cela il est proposé (Miall et Wolpert, 1996) l'existence de deux types de modèles directs de l'appareil sensorimoteur (voire figure 4.6). Le premier type de modèle interne

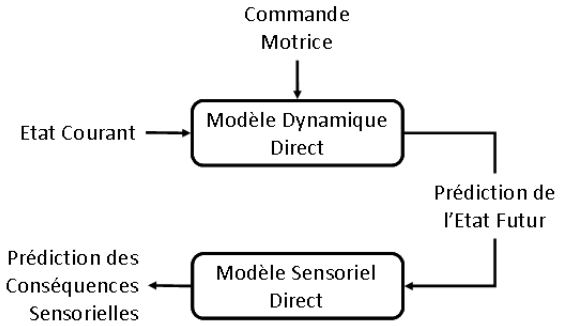


FIGURE 4.6 – Le modèle dynamique direct permet de prédire les conséquences d'une commande motrice sur l'évolution temporelle de l'état d'un membre. Le modèle sensoriel direct quant à lui fournirait une estimation des conséquences sensorielles d'une telle commande.

estime à partir de l'état courant d'un membre (par exemple ses positions et vitesses articulaires ou celles de l'organe terminal) et d'une commande motrice l'état futur dans lequel se trouvera le membre en question. Il est alors appelé modèle dynamique direct de ce membre. Toutefois le système nerveux central peut avoir besoin de connaître les conséquences sensorielles de ce mouvement comme le niveau sonore d'un applaudissement ou la position occupée par ma

main dans mon champ visuel. Ce type de transformation dépeint le fonctionnement des différentes modalités sensorielles et peut être appelé modèle sensoriel direct.

Modèles inverses de l'appareil sensorimoteur

Si les modèles directs de l'appareil sensorimoteur autorisent la prédiction des effets d'une certaine commande motrice, ils ne permettent toutefois pas d'expliquer comment celle-ci est formée. La réalisation des opérations inverses serait alors le résultat des modèles inverses de l'appareil sensorimoteur. Ce type de transformation permettrait en particulier de répondre aux questions de planification de trajectoire et de contrôle des mouvements. Ainsi un modèle dynamique inverse serait en mesure de générer la commande motrice correspondant à une variation d'état désirée d'un membre. Par ailleurs un modèle sensoriel inverse estimerait cet état à partir des informations issues des modalités sensorielles.

Ce type de modèles est couramment utilisé pour la commande des robots. Par exemple, les roboticiens opèrent généralement dans un espace de travail lié à l'organe terminal du robot et non pas dans son espace articulaire. Ils ont alors recours à des méthodes d'inversion de modèles cinématiques et dynamiques directs afin de transformer une trajectoire de l'espace de travail (usuellement en coordonnées cartésiennes) dans l'espace articulaire ainsi que de calculer les couples à générer au niveau de ces articulations pour suivre cette trajectoire. Les efforts exercés au niveau de l'organe terminal sont alors répercutés sur chaque articulation. Théoriquement, il serait même possible de contrôler un robot ou un membre en pure boucle ouverte en ayant seulement recours à des modèles inverses (voir figure 4.7). Cette solution est évidement irréaliste car il serait nécessaire de disposer d'une connaissance parfaite du système contrôlé ainsi que de l'environnement dans lequel il évolue. Toutefois plusieurs schémas de contrôle proposés se basent sur cette notion de boucle ouverte (Kawato, 1999, Flanagan et Wing, 1997, Tees et al., 2004).

Modèles internes de l'environnement

Cette dernière classe de modèles décrit les connaissances acquises relatives à la dynamique de notre environnement et au fonctionnement des objets que nous manipulons. Nous regroupons dans cette même classe à la fois les modèles directs et inverses, dont les principes sont similaires à ceux présentés plus haut. Les travaux de Lacquantini et Maioli (Lacquaniti et Maioli, 1989) suggèrent ainsi que nous disposons de modèles internes nous permettant de prédire avec précision la trajectoire de la chute d'une balle. Dingwell et al (Dingwell et al.,

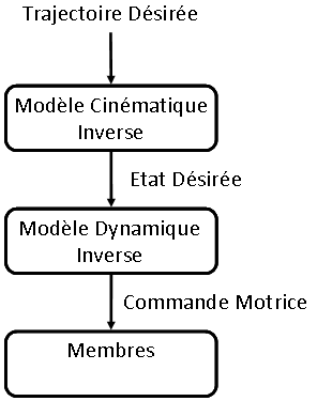


FIGURE 4.7 – Génération de mouvement en boucle ouverte. Le modèle cinématique inverse transforme la trajectoire désirée exprimée dans l'espace de travail en trajectoire dans l'espace articulaire du membre considéré. Le modèle dynamique inverse calcule les consignes à envoyer aux muscles afin de produire les couples articulaires nécessaires à la réalisation des trajectoires articulaires désirées.

2002) obtiennent un résultat similaire : ils arrivent à la conclusion que leurs sujets ont formé un modèle interne de l'objet qu'il leur était demandé de manipuler (objet possédant un degré de liberté, formé d'une masse accrochée à un ressort).

4.4.2 Différentes utilisations des modèles internes

L'approche des modèles internes fonctionnant en synergie permet de décrire la boucle sensorimotrice globale (Wolpert et Ghahramani, 2000). Ainsi la production d'un mouvement requiert l'usage d'un modèle dynamique inverse pour générer les commandes motrices adéquates dont les conséquences sont prédites par le biais des modèles dynamiques et sensoriels directs (voir figure 4.8). Toutefois l'emploi des modèles internes peut être étendu à d'autres contextes pour en partie pallier aux limitations intrinsèques de l'appareil sensorimoteur.

Traitement des signaux sensoriels

Le système nerveux central reçoit des modalités sensorielles deux types d'informations, l'une issue de la stimulation de nos récepteurs sensoriels par notre environnement (signaux afférents), l'autre produite par des actions volontaires (signaux réafférents). Or il est crucial de pouvoir discriminer l'origine de chacune d'entre elles pour interpréter ces signaux. Ainsi le recours aux modèles dynamiques et sensoriels directs permet d'annuler dans le flux sensoriel global

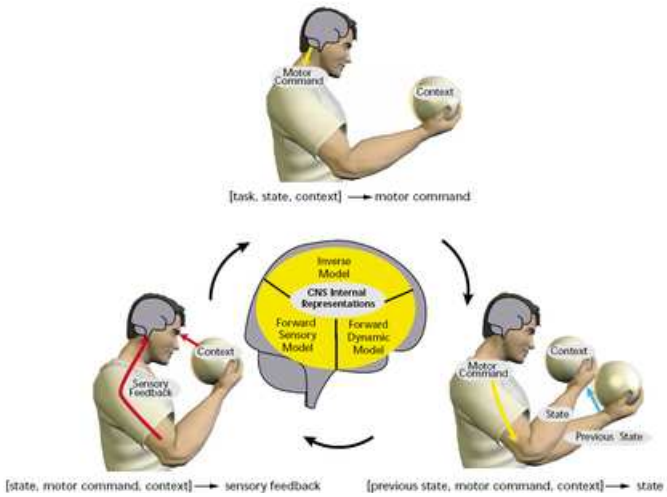


FIGURE 4.8 – Description de la boucle sensorimotrice lors d'un mouvement de la main par l'utilisation synergique de modèles internes

la composante de réafférence (voir figure 4.9).

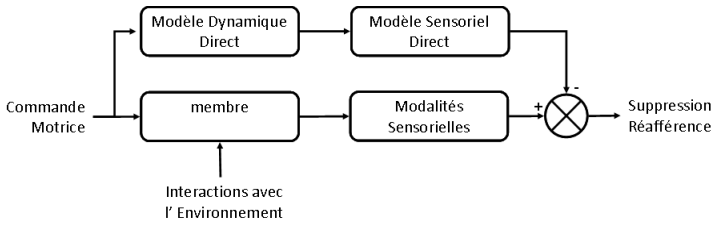


FIGURE 4.9 – Suppréssion des signaux sensoriels réafférents à l'aide de modèles internes dynamique et sensoriel directs.

Estimation et prédiction d'état

La connaissance de l'état courant et futur des membres est nécessaire à la planification de trajectoires et à la réalisation de mouvements complexes et précis. Or les informations sensorielles retardées et bruitées ne sont pas toujours fiables et ne renseignent pas forcément directement sur les variables d'état caractérisant l'action en question. La reconstruction des variables d'états à partir des mesures des capteurs peut être réalisée, dans le cadre de la théorie de la commande par le biais d'un observateur d'état dans lequel les modèles directs et inverses des systèmes pilotés jouent un rôle indispensable. Il est alors légitime de transposer ce concept au système humain (voir figure 4.10).

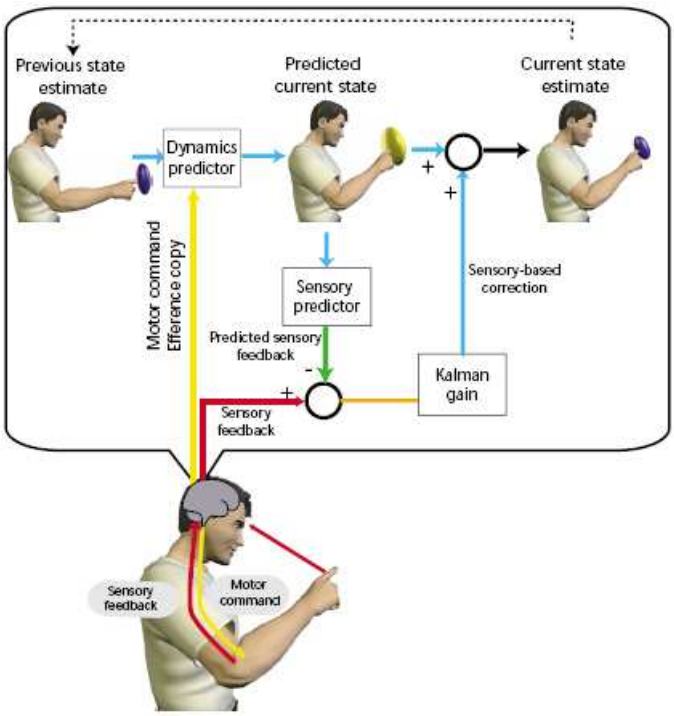


FIGURE 4.10 – Ce schéma décrit l'estimation hypothétique de la position de la main sous la forme d'un filtre de Kalman Wolpert et Ghahramani, 2000). La position courante est estimée à partir des informations sensorielles ainsi que de la prédiction de celles-ci par le biais de modèles directs de l'appareil sensorimoteur. Ces deux sources d'informations sont combinées de manière optimale.

La localisation de la main (après un mouvement dans l'obscurité (Wolpert et al., 1995) ou de contrôle de la posture (Kuo, 1995, Kuo, 2005) fournissent des résultats cohérents avec l'hypothèse d'existence d'observateur d'état. Par ailleurs, les modalités sensorielles peuvent fournir des informations incohérentes. Par exemple une inclinaison de la tête et un mouvement d'accélération linéaire génèrent une même réponse du système vestibulaire. L'utilisation de modèles internes pour l'estimation d'état peut permettre de lever le voile sur ce type d'ambiguïté (Merfeld et al., 2005).

Régulation boucle fermée

La commande de procédés en boucle ouverte seulement n'est dans la pratique pas réalisable. Le contrôle en boucle fermée par rétroaction négative permet de contrer les effets non désirés de perturbation sur système piloté. Or ce type de contrôle se trouve rapidement mis en défaut lorsque le système en question présente des retards. De part les latences des différentes modalités sen-

sorielles, le contrôle du mouvement ne peut se baser exclusivement sur celles-ci. Une éventuelle solution est alors d'identifier ces retards et de les intégrer à la loi de commande à la manière du prédicteur de Smith (voir figure 4.11). Bien

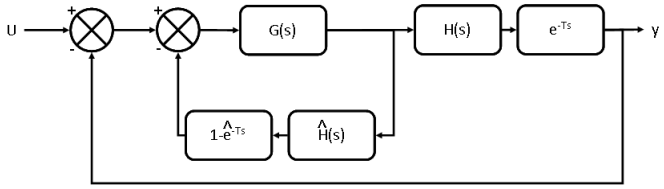


FIGURE 4.11 – Prédicteur de Smith, inspiré de Smith, 1959. Le procédé piloté est dissocié de son retard pur. Le prédicteur dispose d'un modèle interne du procédé sans retard $\widehat{H(s)}$ ainsi que du retard pur lui-même $e^{-\widehat{T}.s}$. Le comportement de ce système est alors équivalent à une régulation de $H(s)$ par $G(s)$ en boucle fermée. La sortie de $H(s)$ étant par la suite retardée de T.

que cette approche ne s'avère efficace qu'en présence de procédés à retard pur et d'une identification correcte de ces paramètres, elle démontre la faisabilité du contrôle de systèmes à retards en boucle fermée basée sur la théorie des modèles internes directs.

4.4.3 Existence

L'intégration d'un modèle dynamique inverse dans un schéma de contrôle sensorimoteur est une hypothèse couramment admise. Les travaux chez le singe de Shidara et al ainsi que ceux de Gomi et al (Shidara et al., 1993, Gomi et Kawato, 1998) suggèrent ainsi l'utilisation de tels modèles internes dans le contrôle oculaire. La faisabilité de recours à ces modèles pour le contrôle des membres tels que le bras est implicite en particulier par les travaux de Gribble et Ostry (Gribble et David, 1999) et de Shadmehr et al (Shadmehr et Mussa-Ivaldi, 1994). La mise en évidence de modèles internes directs est plus problématique. En effet les modèles dynamiques inverses produisent directement une commande motrice qui est envoyée aux effecteurs. Les modèles directs, qu'ils soient sensoriels ou moteurs génèrent des signaux qui subiront des transformations ultérieures. Ces signaux sont donc difficilement observables et mesurables. Le recours à des techniques d'imagerie cérébrales ne peut être pertinent que si un apriori sur la localisation de la génération de tels signaux est connu. Différentes expérimentations de poursuite visuo-manuelle où des retards visuels de différentes amplitudes sont intégrés donnent lieu à des comportements compatibles avec le concept de contrôle avec modèles internes directs (Miall et al., 1993, Miall, 1996). Notons en particulier les travaux de Miall et al (Miall et al., 1993) où les auteurs proposent que le cervelet est capable de générer, à l'image

d'un prédicteur de Smith, à la fois des modèles dynamique et sensoriel directs ainsi qu'une représentation interne des retards de la boucle de perception (propagation et traitement de l'information). Bien que Metha et Schaall (Mehta et Schaal, 2002) démontrent l'incapacité de divers schéma de contrôle (dont l'un basé sur un prédicteur de Smith) à maintenir en équilibre un pendule inverse, les résultats expérimentaux de leurs sujets sont toutefois en accord avec l'utilisation d'un modèle sensoriel direct lors d'une phase de prétraitement des signaux sensoriels. Notons par ailleurs que nous présenterons lors du chapitre concernant l'adaptation sensorimotrice d'autres travaux mettant en évidence à la fois l'existence de modèles internes ainsi que leur mise à jour.

4.5 Conclusion

Les théories du point d'équilibre reposent sur la même hypothèse selon laquelle la transition entre deux postures stables est réalisée par une relaxation combinée des muscles agonistes et antagonistes. L'idée est d'exploiter pleinement les propriétés viscoélastiques des muscles et de leur fonctionnement synergique. La manière dont la position finale d'un mouvement est atteinte a donné lieu à différentes théories. Toutefois les expérimentations visuo-manuelles de pointage dans un environnement rotatif (champ de force de Coriolis perturbateur) fournissent des résultats incompatibles avec les prédictions de telles approches. Ces dernières supposent que ce type de perturbations transitoires n'altérerait pas la position finale du mouvement alors qu'expérimentalement les sujets démontrent des déviations de trajectoire (Lackner et Dizio, 2000). Les théories du contrôle optimal tentent d'expliquer selon quels critères la trajectoire d'un mouvement est planifiée mais ne décrivent pas par contre les processus la mettant en application. L'approche des modèles internes apporte un cadre unificateur global, couvrant à la fois la planification de trajectoire, la génération de commande motrice, la gestion des retards et bruits sensoriels et moteurs et l'anticipation. Toutefois il convient, dans notre contexte de nous interroger sur la manière dont ces représentations internes sont mises à jour lorsque l'environnement dans lequel la tâche est réalisée se voit modifié.

Chapitre 5

L'adaptation sensorimotrice

Sommaire

5.1 Introduction 68
5.2 Les stratégies d'adaptation 68
5.2.1 Adaptation par modulation d'impédance 68
5.2.2 Adaptation par les modèles internes 69
5.2.3 Combinaison de stratégies 73
5.3 Adaptation au contrôle de systèmes 73
5.4 Les informations nécessaires à l'adaptation 75
5.5 Optimisation de l'adaptation 76
5.6 Conclusion 76

5.1 Introduction

Face à un univers changeant et incertain dans lequel nous évoluons, le système nerveux central a besoin de disposer de stratégies de compensation pour réaliser les mouvements voulus. Il dispose pour cela de diverses solutions, comme l'internalisation par apprentissage du comportement imprévu, ou encore la modulation de la robustesse des membres impliqués dans les mouvements et sujets à des perturbations. Nous présenterons quelques résultats classiques mettant en évidence la plasticité du contrôle sensorimoteur. Puis nous rappellerons les différentes stratégies supposées que le système nerveux central peut mettre en application. Nous nous placerons pour cela principalement dans le paradigme des tâches visuomotrices de pointage qui offre un cadre privilégié à l'étude de l'adaptation sensorimotrice. L'objectif est de disposer d'informations suffisantes sur ces différentes stratégies d'adaptation afin d'en intégrer les principes à un modèle de conducteur. Les techniques pour les mettre en œuvre feront l'objet d'un chapitre spécifique.

5.2 Les stratégies d'adaptation

5.2.1 Adaptation par modulation d'impédance

Principe

La coactivation des muscles agonistes et antagonistes a pour effet d'accroître l'impédance mécanique au niveau des articulations (Hogan, 1984). Cela permet d'améliorer la stabilité des membres et de les rendre plus robustes aux perturbations tant internes qu'externes (Bizzi et al., 1982, Cheze, 2005, McIntyre et al., 1996).

Observations expérimentales

Il ressort des travaux de Gribble et al (Gribble et al., 2003) que la modulation d'impédance peut être une stratégie pour améliorer la précision des mouvements du bras. Ils proposent alors à leurs sujets une tâche de pointage vers des cibles de tailles différentes requérant donc plus ou moins de précision du geste. Afin de réduire au maximum l'influence de la vitesse des mouvements des sujets sur la précision de pointage, la cinématique des gestes de chaque essai est enregistrée et contrôlée. Il est en effet indispensable de s'assurer que chaque essai est réalisé à vitesse constante, en raison de l'existence du compromis vitesse précision (loi de Fitt (Fitts, 1954)). L'activité musculaire de sept muscles de l'épaule et du coude a été enregistrée par électromyographie (EMG). Gribble et al notent alors que la cocontraction musculaire décroît avec l'augmentation de la taille de la cible à atteindre et avec la diminution du niveau d'erreur.

Par ailleurs, la modulation d'impédance s'avère être une stratégie efficace selon Hogan (Hogan, 1984) et Flash et al (Flash et Gurevich, 1991) pour contrer des perturbations extérieures lors de la manipulation d'outils.

Limitations

Nous avons vu que la cocontraction des muscles agonistes et antagonistes a un effet stabilisateur sur les articulations et permet de moduler l'impédance globale des membres. Avec une impédance suffisamment élevée, il est envisageable de rejeter tout type de perturbations par le biais de cette stratégie. Toutefois de part le nombre fini de fibres musculaires et de leurs caractéristiques, la force produite par chaque muscle est limitée. De plus cela présenterait un coût énergétique élevé. Notons enfin comme le rappellent Liu et al (Liu et al., 2002), qu'une fibre musculaire ne peut être sollicitée trop longtemps. Ainsi lors d'une contraction volontaire et soutenue, les unités motrices sont victimes de fatigue de part le manque d'oxygène, de glycose, l'augmentation d'acide lactique dans le sang et les muscles. Ces facteurs de fatigue ont pour conséquence d'élever le seuil de décharge des unités motrices et le nombre d'entre elles activées diminue. L'effort maximal que peux générer un muscle décline donc sous une activation longue.

5.2.2 Adaptation par les modèles internes

Principe

Cette stratégie repose sur la théorie des modèles internes. En effet, si nous disposons de représentations internes du monde, il suffit de les mettre à jour lorsque les propriétés de celui-ci changent. Contrairement à la stratégie de modulation d'impédance où la cinématique des mouvements reste inchangée, les commandes motrices deviennent spécifiques au contexte courant.

Observations expérimentales

Les travaux de Held (Held, 1965) représentent une étape importante dans la mise en évidence expérimentale de l'adaptation sensorimotrice par apprentissage. Il proposa à ses sujets une tâche de pointage où ces derniers portaient ou non une paire de lunettes munies de prismes déformant la vision qu'ils avaient de l'espace et donc de la cible. Dans une telle condition, la cible à pointer du doigt se trouvait visuellement décalée de 20 degrés sur la gauche. Les sujets réalisaient tout d'abord la tâche dans des conditions dites nominales, sans altération visuelle puis ils devaient revêtir les lunettes à prismes. Lors de leur première tentative avec ces dernières, les sujets manquaient la cible avec un écart identique à celui induit par les lunettes. Après plusieurs dizaines d'essais,

les sujets étaient capables d'accomplir la tâche et de retrouver le même niveau de performance qu'ils avaient obtenu lors des essais en conditions nominales. Une fois les lunettes retirées, les sujets manquaient la cible de nouveau avec cette fois-ci un écart de valeur identique mais dans le sens contraire à celui observé lors du port des lunettes. Ce phénomène appelé *after-effect* est caractéristique du processus de désadaptation à la suite d'un apprentissage.

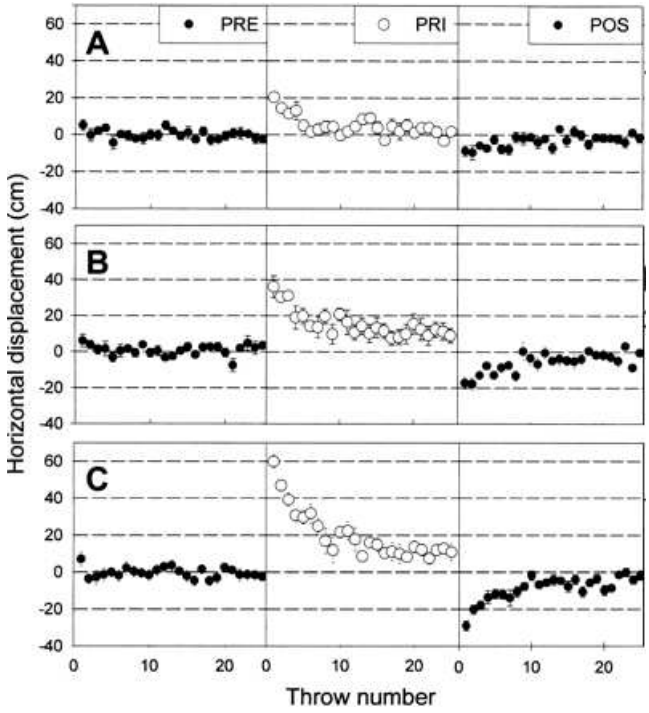


FIGURE 5.1 – Expérimentation de Ferandez-Ruiz et Diaz (Fernandez-Ruiz et Diaz, 1999). Evolution de la performance des sujets avant de porter des lunettes à prismes déformants (PRE), pendant (PRI) et après les avoir retirées (POS) et pour différents niveaux de déformation (A, B et C). En condition PRI, les sujets démontrent une capacité à retrouver un niveau de performance proche de celui obtenu en condition PRE. La condition POS révèle le phénomène d'*after-effect* avec déviation opposée des lancers par rapport au début de la condition PRI.

Ces expérimentations ont permis de démontrer la capacité des sujets à réaffecter à la position de la cible une configuration articulaire de leur bras. Fernandez-Ruiz et Diaz (Fernandez-Ruiz et Diaz, 1999) retrouvent en particulier ces résultats lors d'une tâche de lancer d'une balle sur une cible (voir figure 5.1). Par la suite, le phénomène d'*after-effect* sera considéré comme caracté-

ristique de la construction ou modification d'un modèle interne et permettra entre autre de discriminer les stratégies d'adaptation mises en oeuvre dans les expérimentations.

Dans leurs travaux, Lackner et Dizio (Lackner et Dizio, 1994) étudient l'adaptation à une perturbation non plus visuelle mais motrice. Placés dans un environnement rotatif, les sujets subissent alors un champ de forces de Coriolis artificiel. Ce champ de forces applique alors une contrainte sans contact physique sur les mouvements des bras des sujets dès lors que ceux-ci sont en mouvement, entravant de ce fait leur tâche de pointage. A l'instar de Held, Lackner et Dizio observent une réussite de la tâche par les sujets au bout de quelques dizaines d'essais (voir figure 5.2) ainsi que le phénomène d'*after-effect*.

Des études similaires réalisées par Shadmher et Mussa-Ivaldi (Shadmehr et Mussa-Ivaldi, 1994) permettent de confirmer les résultats de Lackner et Dizio (Lackner et Dizio, 1994) présentés ci dessus, en particulier la présence d'un *after-effect* après la suppression du champ de force perturbateur. Leur dispositif expérimental présente toutefois une différence majeure : le champ de forces perturbateur est réalisé par un bras robotique dont les sujets manipulent l'organe terminal. La force perturbatrice s'applique donc de manière locale, au niveau de la main du sujet, lequel se voit proposé également une tâche de pointage. Les résultats de Shadmehr et al (Shadmehr et Mussa-Ivaldi, 1994) suggèrent la formation par le système nerveux central d'un modèle interne du champ de forces perturbateur produit par le bras robot. Un autre résultat important de leurs études concerne l'isotropie de l'apprentissage : ils observent un *after-effect* dans des zones de l'espace jusque-là inexplorées lors des sessions d'essais précédentes. Ainsi l'utilisation du modèle interne du champ de forces perturbateur formé par les sujets est étendue aux zones non visitées. Par ailleurs, des études suggèrent que le processus d'adaptation concerne à la fois les modèles internes directs et inverses. Ainsi à l'instar de Bhushan et Shadmehr (Bhushan et Shadmehr, 1999), Wang et al (Wang et al., 2001) concluent que la seule mise à jour du modèle interne de dynamique inverse est incompatible avec leurs observations et que nécessairement le modèle interne de dynamique direct est lui aussi sujet à modification.

Limitations

Toutefois la stratégie d'internaliser les propriétés du phénomène perturbateur pour contrer les aléas de l'environnement peut être mise en défaut. Si le système nerveux central présente une plasticité lui permettant la construction d'une représentation interne d'une perturbation, d'un comportement inattendu, il s'avère alors que tout type de phénomène ne peut être reproduit. En particu-

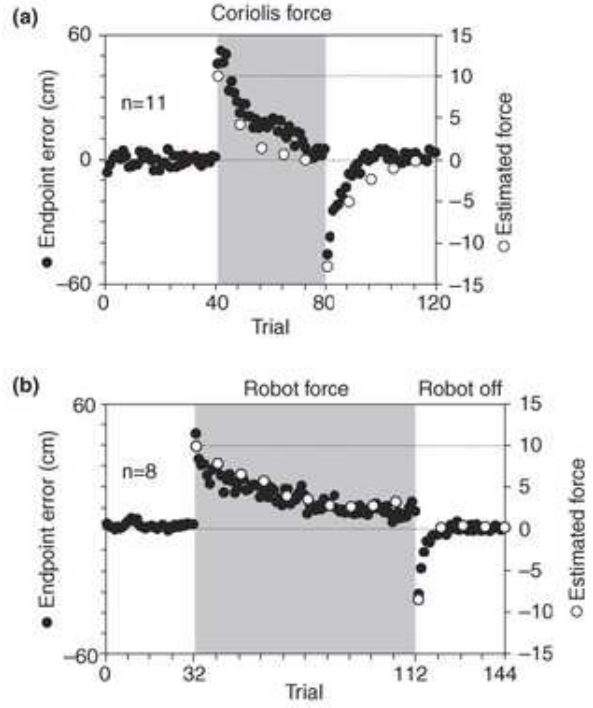


FIGURE 5.2 – D'après Lackner et DiZio, 2005. La figure (a) représente l'évolution du niveau d'erreur de pointage en conditions exempts de perturbation (zones blanches) et avec champ de forces perturbateur (de type Coriolis, zone grisée). La performance des sujets en présence de la perturbation retrouve son niveau nominal après une quarantaine d'essais. La suppression de la perturbation provoque un *after-effect* qui disparait rapidement. La figure (b) représente une expérimentation similaire si ce n'est que le champ de forces perturbateur est produit par un bras robot. Dans ce second cas on note également une disparition rapide de l'*after-effect*.

lier, Takahashi et al (Takahashi et al., 2001) mettent en évidence l'importance du caractère prédictible du comportement de la perturbation. Ils soumettent leurs sujets à une tâche de pointage similaire à celles présentées auparavant. A un champ de forces perturbateur ils ajoutent un bruit aléatoire. Ils concluent à la capacité du système nerveux central à compenser le comportement moyen de la perturbation par la formation d'un modèle interne mais aussi par une augmentation de l'impédance des bras des sujets pour réduire les erreurs de prédiction issues des inexactitudes de leur modèle interne.

5.2.3 Combinaison de stratégies

Il apparaît ainsi qu'une combinaison des différentes stratégies d'adaptation soit mise en oeuvre afin d'offrir un haut niveau de performance. Gribble et al (Gribble et al., 2003) remarquent qu'au fil des essais, la cocontraction musculaire des sujets diminue, tout en maintenant leur niveau de performance. Cette observation est compatible avec l'hypothèse que la modulation d'impédance est une stratégie mise en oeuvre lors de l'apprentissage d'une tâche motrice, le temps qu'un modèle interne soit construit par le système nerveux central. Ainsi, l'exploration d'un nouvel environnement dynamique donne lieu au fil de l'apprentissage à une diminution de la cocontraction musculaire des membres impliqués. Milner et Franklin (Milner et franklin, 2005) concluent que la modulation d'impédance permet de réagir rapidement à des perturbations nouvellement rencontrées tout en permettant d'en former un modèle interne grossier. Il semble par ailleurs que cette stratégie soit aussi utilisée lorsque des sujets sont présentés à des environnements déjà rencontrés auparavant(Thoroughman et Shadmehr, 1999). Selon l'hypothèse que le système nerveux central stocke en mémoire les modèles internes qu'il a établi par le passé, le recours à la modulation d'impédance autoriserait la commutation, le passage d'un modèle à un autre lorsque celui-ci n'est plus approprié. Cette combinaison de la modulation d'impédance et d'apprentissage (mise à jour de modèle interne) n'est pas sans rappeler les observations de Smith et al (Smith et al., 2006) ; il est en effet envisageable de penser que la stratégie de modulation d'impédance peut présenter des capacités de rétention de l'apprentissage limitées par rapport à la stratégie d'apprentissage.

5.3 Adaptation au contrôle de systèmes

Nous avons vu précédement que la stratégie d'adaptation par rétrocontrôle peux s'avérer efficace pour des mouvements lents, elle semble toutefois inappropriée à des mouvements plus rapides, complexes et nécessitant une grande précision. Cela de part les niveaux de bruits et retards de transmission intrinsèques aux voies sensorielles mais aussi aux caractéristiques dynamiques des objets manipulés. La stratégie de modulation d'impédance peut, à l'instar de la stratégie visuelle, être indépendante de tout modèle interne ou du moins de sa mise à jour dans un contexte changeant. Cette solution permet de conserver toujours les mêmes caractéristiques cinématiques de mouvement et ce quelque soit l'environnement rencontré. La formation de la trajectoire de référence peut être le résultat d'un apprentissage de type "essai-erreur". Par ailleurs, de nombreuses expérimentations suggèrent que le système nerveux central a la capacité de former et de maintenir à jour un modèle interne de la dynamique des

membres lorsque ceux-ci voient leurs propriétés modifiées par quelque artifice que ce soit. Dans ces différentes études, l'apprentissage permet de retrouver des mouvements avec des caractéristiques cinématiques similaires à celles obtenues avant l'introduction dans un environnement modifié.

Dingwell et al (Dingwell et al., 2002) s'interrogent sur la compatibilité entre la stratégie qu'un sujet peut utiliser pour manipuler des objets non rigides et un contrôle basé sur une prédiction du comportement de l'objet manipulé. Pour ce faire, ils proposent à leurs sujets une tâche de pointage avec manipulation d'un système masse-ressort (voir figure 5.3). Les caractéristiques (masse et raideur) de ce système sont modifiées inopinément mais tout en garantissant les mêmes propriétés cinématiques (constantes de temps). Ils observent que suite à leur adaptation, les sujets présentent des mouvements dont la cinématique est significativement différente, preuve d'un contrôle prédictif (et donc basé sur des modèles internes). L'occurrence de modifications à "cinématique constante" des caractéristiques dynamiques du système manipulé a eu pour conséquence de dévier les trajectoires des mouvements des sujets. Déviations qui n'auraient pas pu être observées si une stratégie par modulation d'impédance avait été employée. Ils observent même que les mouvements sont réalisés à de faibles niveaux d'impédance et ce malgré les modifications des caractéristiques du système "masse-ressort". Enfin leurs simulations des différentes stratégies possibles démontrent que la stratégie visuelle seule ne peut expliquer les résultats expérimentaux obtenus relatifs aux profils de vitesse des mains des sujets lors des pointages successifs. Ainsi, leurs résultats suggèrent que les sujets ont eu recours à des stratégies faisant appel à des modèles internes.

La capacité des sujets à contrôler des objets de dynamique plus complexe et changeante a fait l'objet d'études en particulier dans l'aéronautique. (McRuer et al., 1968a, McRuer, 1980, Miller et Elkind, 1967, Elkind et al., 1964). Il a été alors observé que les sujets étaient capables de s'adapter à une modification du système piloté (facteur d'échelle, changement de polarité d'un gain), adaptation qui pouvait être quasi immédiate (quelques secondes seulement) ou nécessiter une plus longue durée de pratique selon la complexité du dispositif contrôlé (Elkind et al., 1964). Toutefois dans certains cas (Miller et Elkind, 1967), les sujets avaient été auparavant entraînés aux différents contextes testés, ils devaient donc faire face à des commutations impromptues de modes de fonctionnement connus. Leur stratégie d'adaptation se basant alors sur le choix, entre plusieurs modèles internes, de celui le plus en adéquation avec le contexte courant.

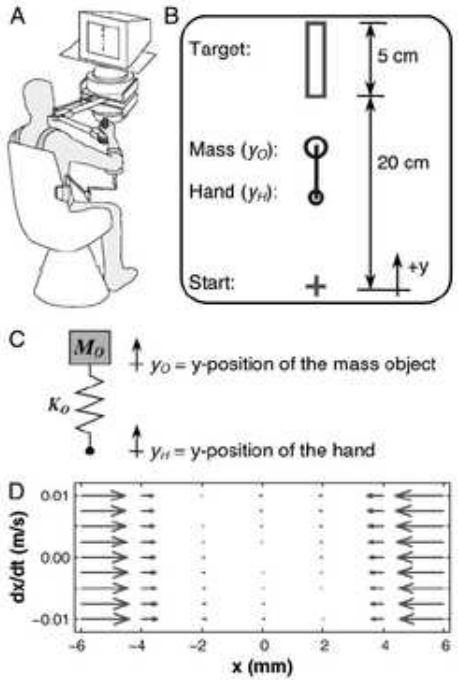


FIGURE 5.3 – D'après Dingwell et al., 2002. Dispositif expérimental (A). Les sujets manipulent un système masse-ressort (C) virtuel lors d'une tâche de pointage vers une cible (B) dont les efforts sur la main des sujets sont générés au travers du bras robot. Un champ de forces supplémentaire est appliqué afin de contraindre le mouvement du sujet à des déplacements rectilignes selon l'axe y. Les valeurs de la masse et de la raideur du système virtuel sont modifiées pendant l'expérimentation. Les résultats suggèrent un contrôle à faible impédance, basé sur un modèle inverse de la dynamique du système manipulé.

5.4 Les informations nécessaires à l'adaptation

Pour que le système nerveux central puisse construire (apprendre) et mettre à jour (adapter) ces modèles internes, il lui est nécessaire de disposer d'informations relatives à l'évolution de l'appareil sensorimoteur et de l'environnement. Si le rôle de la modalité visuelle dans les tâches visuomotrices (pointage, poursuite) est prédominant, il n'en n'est pas pour autant exclusif. En effet Vercher et al (Vercher et al., 2003) suggèrent que les informations proprioceptives sont nécessaires à la construction et au paramétrage de la représentation interne de la dynamique du bras. Franklin et al (Franklin et al., 2007) en arrivent à la même conclusion. Ils soumettent leurs sujets à une tâche de pointage dans différents contextes dynamiques (par le biais d'un bras à retour d'efforts). Deux conditions sont testées : avec ou sans retour visuel de la position courante de la main

lors du déplacement vers la cible. Ils concluent que l'information visuelle lors du pointage vers la cible n'est pas indispensable au processus d'adaptation mais que celle-ci permet d'accroître la précision finale du mouvement. Par ailleurs Milner et Hinder (Hinder, 2006) proposent que la mise à jour des modèles internes reposerait sur un signal d'erreur relatif à la déviation du mouvement suite à perturbation plutôt que sur le niveau de force de celle-ci.

5.5 Optimisation de l'adaptation

Dans les tâches de pointage, les sujets effectuent généralement de leur main une ligne droite entre le point de départ de celle-ci et la position de la cible à atteindre. Ainsi lorsqu'ils sont en présence d'un champ de forces perturbateur, la trajectoire de leur main s'en trouve dans un premier temps déviée puis redevient à la suite de quelques dizaines d'essais, droite. Il est alors légitime de supposer que l'objectif du système nerveux central est de conserver une même cinématique du mouvement. Donchin et Shadmehr s'intéressent quant à eux (Donchin et Shadmehr, 2004) aux qualités de cette adaptation à plus long terme. Ils proposent ainsi à leurs sujets des tâches de pointage en environnement perturbé qui se déroulent sur plusieurs jours. Ils observent alors que les trajectoires réalisées par les sujets s'incurvent et par conséquent ne sont plus droites. En outre, ils observent que s'ils intercalent lors de l'apprentissage du nouveau champ de forces quelques essais plus ou moins fréquents où la perturbation est annulée, cela modifie également les trajectoires des sujets. Ils en viennent alors à la conclusion que la planification de la trajectoire à suivre lors de la tâche n'est pas statique et seulement guidée par un unique critère d'optimisation (par exemple le critère de secousse minimale ou de changement de couple minimal) mais dépend aussi de l'environnement et de la probabilité de réussite de la tâche (en quelque sorte anticipation par sur ou sous compensation d'éventuelles occurrences d'autres perturbations). Il est en effet concevable d'imaginer que le système nerveux central peut exploiter par exemple un champ de forces perturbateur pour réaliser des mouvements à moindre coût énergétique.

5.6 Conclusion

Le système nerveux central dispose de différentes stratégies pour contrer l'inattendu. La modulation d'impédance permet de modifier la robustesse des mouvements mais s'avère à moyen et long terme coûteux en énergie et sollicitant pour les muscles. La construction et mise à jour de modèles internes autorisent l'anticipation et l'adéquation des actions avec leur contexte courant. Le rétrocontrôle visuel s'avère rapidement limité de par les contraintes intrinsèques du système sensorimoteur. Toutefois il a été mis en évidence que ces stratégies

peuvent se combiner afin d'exploiter les qualités de chacune et d'offrir un niveau de performance maximale. Il apparait alors crucial pour notre problématique d'intégrer ces différentes stratégies pour à la fois comprendre les comportements observés expérimentalement, discriminer les stratégies employées, le poids de chacune et prédire finalement les potentiels de performance compte tenu des contraintes physiologiques. La mise en application de ces stratégies nécessite de disposer d'outils mathématiques : l'inspiration peut être issue de la théorie de la commande adaptative.

Chapitre 6

Le contrôle adaptatif

Sommaire

6.1 Introduction 80
6.2 Schémas classiques 80
6.2.1 Gain Scheduling 81
6.2.2 Multi Model Adaptive Control 82
6.2.3 High Gain Adaptive Control 83
6.2.4 Model Reference Adaptive Control 85
6.2.5 Feedback Error Learning 86
6.2.6 Adaptive Sliding Control 88
6.3 Caractéristiques 90
6.3.1 Performances 90
6.3.2 Analogies avec le contrôle sensorimoteur 91
6.4 Conclusion 93

6.1 Introduction

Le contrôle de systèmes naturels ou artificiels est une préoccupation humaine que l'on retrouve dès l'antiquité avec les clepsydres de Ktesibios d'Alexandrie (270 A.C.) et d'Héron d'Alexandrie (150 A.C.) qui proposèrent des dispositifs de maintien du débit d'écoulement d'eau à un niveau constant. L'un des premiers systèmes de régulation par rétroaction à être utilisé dans le milieu industriel est le régulateur à boule de James Watt (1736 - 1819) permettant de maintenir constante la vitesse des machines à vapeur. Ces fluctuations de vitesse provoquant une détérioration prématurée des transmissions mécaniques. L'avènement de l'électronique et de l'informatique a permis un essor fulgurant de la discipline si bien qu'une multitude de techniques ont vu le jour. L'une des préoccupations dans la conception de systèmes de contrôle est la prise en compte, la gestion du caractère changeant du dispositif contrôlé (usure des éléments le constituant, méconnaissance des différents mécanismes régissant son comportement, etc.) et fait l'objet d'un domaine d'étude particulier : le contrôle adaptatif. Un schéma générique de contrôle adaptatif repose généralement sur trois éléments clés : un critère de coût, une loi d'adaptation et une loi de commande. Le critère de coût est optimisé lors de l'exécution du contrôleur adaptatif. Il peut s'agir par exemple de la minimisation d'une erreur de suivi lors d'une tâche de poursuite. La loi d'adaptation décrit la manière dont les connaissances sont accumulées. Ces connaissances sont obtenues par l'intermédiaire du critère de coût ainsi que des écarts entre les connaissances à priori du système contrôlé et celles obtenues par observation de son comportement réel. La loi de commande décrit la manière dont les connaissances accumulées par l'apprentissage sont employées. Ses paramètres sont donc ajustables. Par soucis de clarté, nous présenterons différents schémas classiques de contrôleurs adaptatifs dans le cas de systèmes mono-entrée/mono-sortie (systèmes $SISO$ pour $Single\ Input - Single\ Output$). Nous aborderons enfin les parallèles pouvant être établis entre ces différents schémas et les propriétés adaptives du système sensorimoteur.

6.2 Schémas classiques

Nous nous attarderons dans cette partie à présenter le principe de fonctionnement de plusieurs contrôleurs adaptatifs classiques. En particulier, nous ne nous focaliserons pas sur les détails concernant leur validation analytique (stabilité, convergence de l'apprentissage, etc.).

6.2.1 Gain Scheduling

La technique du *Gain Scheduling* ou de la planification de gain apparaît dès les années 50 avec les prémices des pilotes automatiques dans le domaine de l'aéronautique (Schaal, 1999). Cette stratégie de contrôle adaptatif dont un schéma est proposé figure 6.5, fût en particulier utilisée sur l'aéronef expérimental *North American* X15 (voir figure 6.2). Face à la volonté de contrôler un processus dont la dynamique est hautement non-linéaire, l'idée réside dans l'identification de points de fonctionnement du dit processus. La dynamique de ce dernier est alors linéarisée autour de ces points et un contrôleur est établi afin d'obtenir le comportement global désiré. La structure du contrôleur est figée et seuls ses paramètres sont modifiés. La transition entre deux jeux de paramètres peut être brusque ou interpolée. A chaque point de fonctionnement identifié correspond un jeu de paramètres adéquat du contrôleur. Un contrôleur adaptatif par planification de gain doit être composé d'une carte de planification (liste des ensembles "point de fonctionnement - jeu de paramètres") et d'une stratégie de détection de changement d'état du processus piloté.

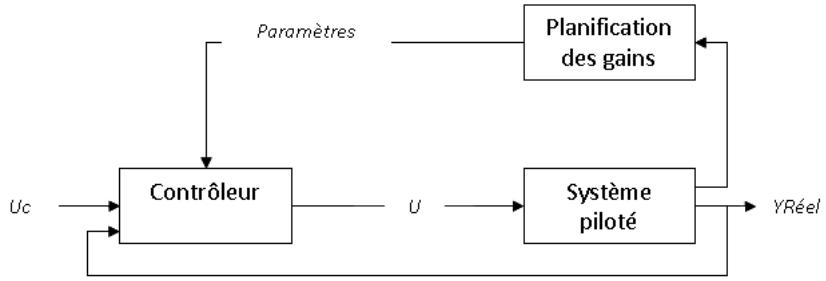


FIGURE 6.1 – Schéma block d'un contrôleur adaptatif par planification de gain. Des mesures du processus piloté permettent d'identifier le point de fonctionnement courant et de choisir au travers de la carte de planification les paramètres adéquats du régulateur.

Bien que cette approche soit dite adaptative, elle n'est efficace que pour les cas de figures anticipés au préalable lors de l'établissement de la carte de planification. Au cas où un point de fonctionnement non répertorié survient, le contrôleur ne pourra y faire face efficacement. Une grande attention est ainsi portée sur la réalisation de ces cartes car le contrôleur ne pourrait corriger en ligne des erreurs à ce niveau. Une autre difficulté de cette approche provient de l'identification en temps réel de ces points de fonctionnement ainsi que de la détection du passage d'un point à un autre. Idéalement, la vitesse de détection doit être inférieure à la vitesse de changement de point de fonctionnement afin d'éviter l'utilisation prolongée d'un jeu de paramètres inadaptés. Il semble par

ailleurs nécessaire de ne pas choisir de tels points trop proches afin d'éviter des changements trop fréquents et trop rapides qui peuvent être source d'instabilités (Ioannou et Sung, 2003). Cette technique est en particulier utilisée dans les travaux de Kuo (Kuo, 1995), pour modéliser le contrôle de la posture lorsque celleci est soumise à de faibles perturbations.



FIGURE 6.2 – Photos du *North American* X15 (NASA). Cet aéronef dont la vitesse maximale et le plafond atteignaient respectivement Mach 6.7 (7200km/h) et 108km, servi de support aux développements de pilotes automatiques par la technique de la planification de gains (NASA, 1971). Les point de fonctionnement étaient définis par le doublet "mach-altitude", le régulateur ayant pour objectif de stabiliser le roulis, le lacet et le tangage et d'appareil.

,

6.2.2 Multi Model Adaptive Control

Le contrôle adaptatif par sélection de modèle est dans son principe relativement proche par différents aspects du contrôle par planification de gains (Gain Scheduling). Il s'agit d'identifier les différents points de fonctionnement d'un système à piloter et d'y associer un contrôleur et un modèle de référence spécifique. Ainsi, la commande U envoyée au système est également transmise aux différents modèles de référence dont les sorties sont comparées avec la mesure réelle Y_{Reel}. Le modèle de référence offrant la réponse la plus proche de la mesure réelle permet de définir le point de fonctionnement dans lequel se trouve le système piloté et de recourir au contrôleur correspondant. Cette technique permet de s'affranchir d'une des limitations de la méthode de planification de gain relative à la structure figée de ce dernier. En effet, il est envisageable de recourir à des formes très variées selon la situation courante. Toutefois, cela

implique un important travail préparatoire de mise au point de contrôleurs, proportionnellement au nombre de points de fonctionnement identifiés. Wolpert et

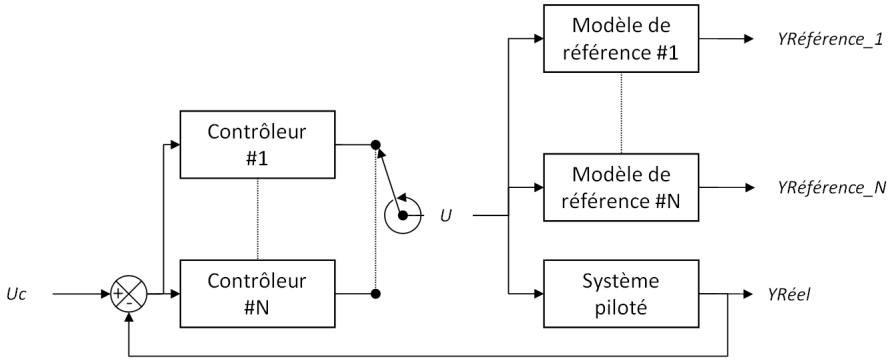


FIGURE 6.3 – Schéma block générique d'une architecture de contrôle de type Multi Model Adaptive Control. Le mécanisme de commutation (non représenté ici) compare les réponses des différents modèles de référence à celle produite par le processus réell, soumis à la même excitation. Une fois identifié le modèle de référence le plus en adéquation avec l'état courant du système, le contrôleur correspondant est sélectionné.

Kawato (Wolpert et Kawato, 1998) proposent ainsi un modèle de contrôle et d'apprentissage moteur de type Multi Model Adaptive Control basé sur des paires de modèles inverses (pour le contrôle) et directs (pour la prédiction) qui démontre des capacités similaires au système sensorimoteur humain tant au niveau de l'apprentissage de tâches, de la généralisation à des tâches non rencontrées au préalable et enfin à la commutation adéquate entre les paires de modèles inverses et directs selon les tâches proposées.

6.2.3 High Gain Adaptive Control

Généralement, la question de la régulation ou de l'asservissement à un état de référence du comportement d'un système à piloter trouve une réponse dans la théorie de la commande à rétroaction négative. L'architecture du dispositif global est illustrée par la figure 6.4, celle-ci se compose succinctement de trois éléments : le système à piloter, un comparateur mesurant l'écart entre les états désiré et courant du système à piloter et enfin un contrôleur injectant au système des commandes visant à annuler la différence d'état citée précédemment. Le travail de l'automaticien est alors de déterminer les paramètres du contrôleur garantissant le respect d'un cahier des charges. En notant $C(s)$ et $M(s)$ les fonctions de transfert décrivant respectivement le comportement du contrôleur et du système à piloter, la fonction de transfert global du système asservi prend

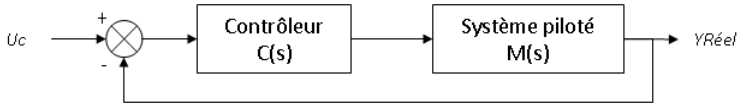


FIGURE 6.4 – Schéma block générique d'un contrôleur par rétroaction négative.

la forme :

$$\frac{YReel}{Uc} = \frac{C(s).M(s)}{1 + C(s).M(s)} \tag{6.1}$$

De l'équation 6.1 apparaît que pour des choix de valeurs de gains de $C(s)$ tels que le gain de la boucle fermée $\|C(s).M(s)\|$ soit suffisamment important, $YReel \approx Uc$, et ce dans une certaine mesure, malgré des variations au niveau du système à piloter $M(s)$. Toutefois il est impératif de s'assurer que la stabilité de cette boucle fermée ne soit pas mise à mal par des choix de gains trop importants.

Ainsi il a été proposé d'indexer les valeurs des paramètres du contrôleur en fonction du niveau d'erreur entre état de référence et état courant, cela afin de garantir, selon chaque situation, un jeu de valeurs juste nécessaire. Cette stratégie prend alors le nom de commande par gains adaptatifs (High Gain Adaptive Control) dont un schéma block de principe est proposé figure 6.5. La

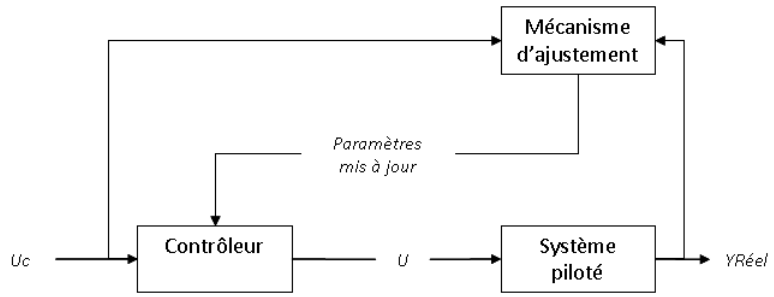


FIGURE 6.5 – Schéma block d'un contrôleur adaptatif de type HGAC.

structure de la loi de commande est souvent déjà choisie, l'enjeu étant alors d'établir une loi d'adaptation adéquate. Généralement, l'évolution des gains du contrôleur est pilotée par l'erreur quadratique de poursuite (Polderman et Mareels, 2004). Prenons l'exemple d'un contrôleur de type proportionnel de gain $K(t)$. La loi d'adaptation est alors :

$$\frac{dK(t)}{dt} = \eta.(Y_{Reel}(t) - Uc(t))^2 \tag{6.2}$$

Le paramètre η rend compte de la sensibilité de la loi d'adaptation à l'erreur quadratique de poursuite et peut être interprété comme la vitesse d'adaptation du contrôleur. Toutefois cette loi d'adaptation s'avèrant sensible aux bruits

et erreurs de mesures, des évolutions ont alors été proposées. Une première solution fût d'intégrer un terme de "frottement" pour éviter d'éventuelles oscillations et divergences de $K(t)$:

$$\frac{dK(t)}{dt} = -\sigma.K(t) + \eta.(Y_{Reel}(t) - Uc(t))^2 \tag{6.3}$$

Polderman (Polderman et Mareels, 2004) rappelle qu'afin de prévenir toute décroissance de $K(t)$ et éviter ainsi d'éventuelles instabilités du contrôle, il est recommandé de forcer la loi d'adaptation à des valeurs positives :

$$\frac{dK(t)}{dt} = max(0, -\sigma.K(t) + \eta.(Y_{Reel}(t) - Uc(t))^2) \tag{6.4}$$

Ilchmann et al. (Ilchmann et Ryan, 2008) proposent quant à eux de ne déclencher la mise à jour de $K(t)$ que lorsque le niveau d'erreur atteint un certain seuil λ :

$$\frac{dK(t)}{dt} = max(0, (Y_{Reel}(t) - Uc(t))^2 - \lambda) \tag{6.5}$$

Au sein de la famille des contrôleurs auto ajustables, la technique HGAC est sans doute l'une des plus simples à mettre en œuvre. L'apprentissage est non supervisé et les connaissances acquises sur le système piloté sont agrégées seulement au niveau des paramètres du contrôleur et donc difficilement réexploitables. Ce type de stratégie rappelle les capacités du système sensorimoteur à moduler par co-activation musculaire l'impédance de membres impliqués dans une tâche soumise à perturbations (voir chapitre 5), stratégie permettant de répondre rapidement à des évènements perturbateurs lors de l'élaboration ou mise à jour de modèles internes.

6.2.4 Model Reference Adaptive Control

Ce type de contrôle adaptatif trouve son origine dans la commande par modèle de référence (Ioannou et Sung, 2003) dont deux schémas de principe sont présentés aux figures 6.6 et 6.7. Dans ce type de contrôle, l'objectif est d'obtenir du système bouclé (contrôleur + système à piloter) un comportement identique à celui d'un modèle de référence, caractérisant le comportement global attendu. Pour que cette approche soit performante, il est crucial de disposer de connaissances précises quant aux paramètres caractérisant le système piloté sans quoi il sera impossible d'obtenir le mimétisme comportemental attendu. Afin de s'affranchir de cette limitation, des techniques d'ajustements du vecteur de paramètres θ du contrôleur ont été développées (voir figure 6.6). Le mécanisme de mise à jour est fondé sur un critère de coût J ainsi que sur une loi d'ajustement. Le mécanisme le plus courant est la règle MIT (*MIT rule*, Sevcik, 2008) fondée sur l'erreur quadratique entre la sortie du modèle de référence et celle du système piloté (voir équations 6.6). Il est généralement supposé

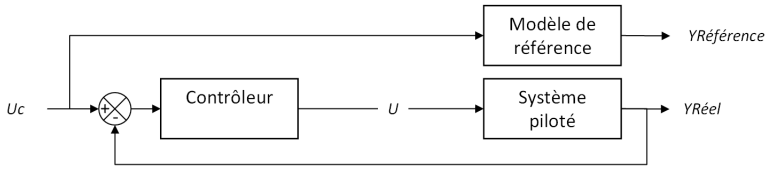


FIGURE 6.6 – Schéma block de principe d'un contrôleur par modèle de référence (MRC). L'objectif de cette technique est de proposer un paramètrage du contrôle pour que le comportement en boucle fermée de l'ensemble coïncide avec celui issu du modèle de référence et ce quelque soit le signal de consigne. Un point délicat de cette technique est la parfaite connaissance des caractéristiques du système piloté.

que le vecteur de paramètres θ évolue moins vite que les autres variables du système. Le paramètre γ définit la vitesse de l'ajustement.

$$J(\theta) = \frac{1}{2}.(Y_{Reference} - Y_{Reel})^2 \tag{6.6}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma.\frac{\partial J}{\partial \theta} \tag{6.7}$$

Il existe des critères alternatifs comme $J(\theta) = |Y_{Reference} - Y_{Reel}|$ (Bhat, 2007). Toutefois la règle MIT présente certains inconvénients : elle ne garantit pas la convergence vers l'état désiré ni même la stabilité du contrôle du système en boucle fermée. Le recours aux fonctions de Lyapunov pour définir la règle d'ajustement permet de prouver la stabilité de l'apprentissage (Bhat, 2007). Dans le cadre d'un schéma de contrôle basé à la fois sur une commande de type boucle ouverte et de type boucle fermée, le contrôle adaptatif par modèle de référence peut aussi être utilisé afin de mettre à jour simultanément les paramètres de ces deux boucles (Tin et Poon, 2005).

L'approche MRAC est très versatile, de tels contrôleurs peuvent être indirects ou directs selon que l'identification des paramètres du contrôleur nécessite ou non l'estimation des paramètres du processus piloté. Ils sont aussi capables d'être transformés en observateurs du système piloté dès lors que les rôles sont inversés.

6.2.5 Feedback Error Learning

Dans cette approche, l'architecture de contrôle présente deux niveaux. Le premier niveau réalise, par le signal U_{BO}, un contrôle en boucle ouverte du système à piloter en se basant sur un modèle dynamique inverse de ce dernier. Le second niveau corrige en boucle fermée la différence entre l'état désiré et l'état courant dans lequel se trouve le processus (voir figure 6.8) en y injectant

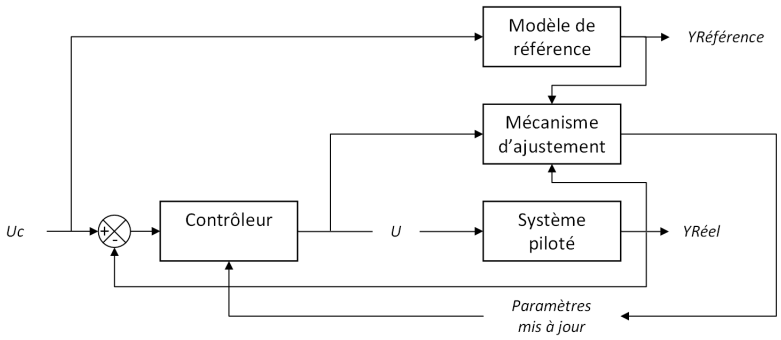


FIGURE 6.7 – Schéma block d'un contrôleur adaptatif par modèle de référence (MRAC).

le signal U_{BF}. L'idée est alors d'alimenter par ce signal de correction l'apprentissage du modèle interne de la partie boucle ouverte du contrôle. Dès lors qu'une erreur de suite survient, la composante U_{BF} n'est plus nulle et donc le processus d'adaptation est déclenché. La loi d'ajustement des paramètres θ du modèle interne de la dynamique inverse du processus piloté noté $\hat{M^{-1}}$ prends la formulation décrite par l'équation 6.8.

$$\frac{d\theta}{dt} = \gamma.grad(\hat{M^{-1}}).U_{BF} \tag{6.8}$$

La vitesse de l'ajustement est accessible au travers de la variable γ. Il apparaît que les paramètres du modèle interne peuvent subir à tort une mise à jour dès lors qu'intervient une perturbation extérieure au processus piloté. Nous remarquons par ailleurs que ce schéma de contrôle présente la particularité de permettre un contrôle et un apprentissage simultanés.

Kawato et Gomi (Kawato et Gomi, 1993) proposent d'expliquer par une telle architecture le fonctionnement de certains circuits neuronaux (en particulier la boucle cortico-cérébelleuse) susceptibles de programmer l'action motrice.

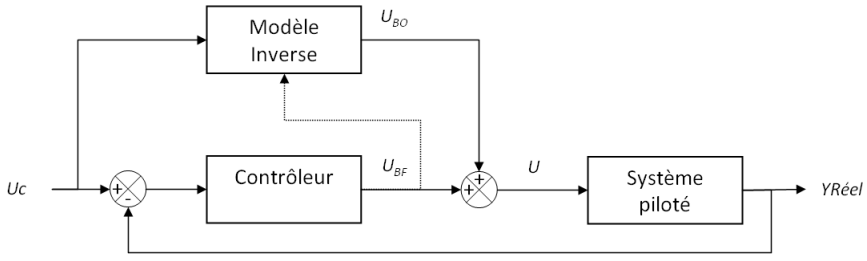


FIGURE 6.8 – Schéma block d'un contrôle de type *Feedback Error Learning*.

6.2.6 Adaptive Sliding Control

Dans le contrôle de systèmes non linéaires, une difficulté majeure est d'être confronté à des incertitudes qui sont en partie engendrées par des simplifications de modélisation, une connaissance inadéquate du procédé étudié. Ces incertitudes peuvent rendre les schémas de contrôle classiques rapidement inefficaces d'où la nécessité de développer des contrôleurs surpassant cette limitation : il s'agit de l'approche robuste. Le contrôle par modes glissants est une technique issue de cette approche. Elle repose sur la définition d'une surface glissante s, combinaison linéaire de signaux du système mesurables. La stratégie de contrôle se fait alors de manière séquentielle, en deux étapes, la première consistant à amener l'état du système à l'une des surfaces glissantes puis de l'y maintenir (voir figure 6.9). Le maintien de l'état du système sur une surface glissante est alors garanti car la loi de contrôle est conçue pour être stable au sens de Lyapunov sur une telle surface (Slotine et Li, 1991). Une surface glissante dépend de l'état du système X et du temps t. Elle est généralement basée sur un signal d'erreur $e(t)$, écart entre des états désirés et mesurés. Pour un système dynamique d'ordre n, une formulation de surface glissante peut être :

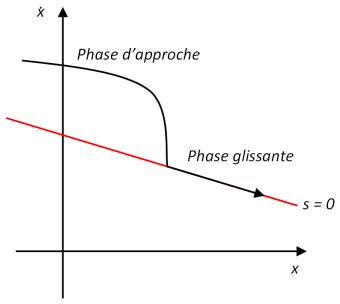


FIGURE 6.9 – D'après Slotine et Li, 1991. Schéma de principe du contrôle par surfaces glissantes. La première étape que réalise le contrôleur est d'amener le système dans l'état désiré caractérisé par la surface glissante s = 0 puis dans un deuxième temps, de l'y maintenir. Avec une loi de contrôle adéquate, cet état d'équilibre est stable au sens de Lyapunov.

$$s(X,t) = \sum_{i=0}^{n-1} \delta_i \frac{d^i e}{dt^i} \tag{6.9}$$

Avec $\forall\ i \in [0, n-1]$, $\delta_i > 0$. Une particularité du contrôle par modes glissants est alors de transformer un système à dynamique d'ordre n en un système du premier ordre par une simple différenciation de la surface glissante par rapport au temps. La stabilité à la surface $s = 0$ se démontre par l'intérmédaire de la

fonction de Lyapunov candidate (voir A) :

$$V(X,t) = \frac{1}{2}.s(X,t)^2 \tag{6.10}$$

Le contrôle par modes (ou surfaces) glissants fait appel à un modèle interne du processus piloté dont le niveau d'erreur par rapport au processus réel est généralement borné. Il est toutefois possible, comme rappelé dans Hanneton, 1999 de mettre à jour cette représentation interne en faisant appel à la loi d'adaptation suivante :

$$\frac{d\theta}{dt} = (u_s - \frac{ds}{dt}).grad(\hat{M}) \tag{6.11}$$

Avec $\hat{M}$ la représentation interne de la dynamique du système contrôlé définie par les paramètres θ. Le terme u_s désigne la loi de commande établie auparavant et assurant la condition de Lyapunov sur la négativité de la fonction candidate. Une telle loi d'adaptation n'est pas sans rappeler la relation 6.8 établie pour l'apprentissage par rétroaction (feedback-error learning). A l'instar

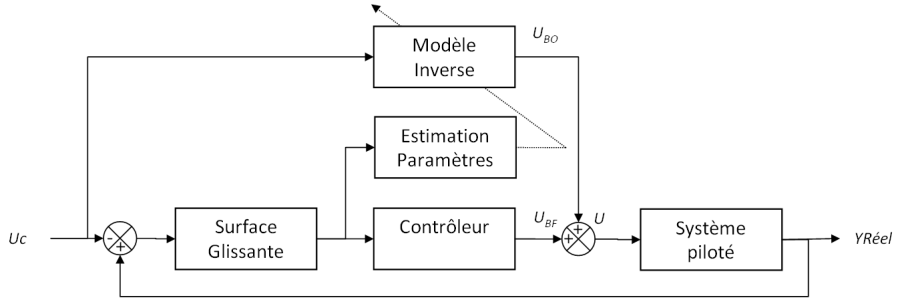


FIGURE 6.10 – D'après Tin et Poon, 2005. Schéma block de principe du contrôle adaptatif par surfaces glissantes. Deux boucles de contrôle interviennent dans la réalisation de la commande. L'une ouverte où les paramètres du modèle interne sont estimés en ligne et l'autre fermée, basée sur la combinaison linéaire de la variable glissante et de ses dérivées.

du modèle de contrôle adaptatif de Kawato (Kawato et Gomi, 1993), le contrôle adaptif par surfaces glissantes présente des similitudes avec le contrôle dual impédance - modèle interne observable chez l'Homme. ce type de contrôle a par ailleurs été mis en œuvre avec succès sur des robots manipulateurs démontrant ainsi la robustesse de la stratégie de contrôle vis-à-vis de perturbations induites par des paramètres inconnus de charge de l'organe terminal.

6.3 Caractéristiques

6.3.1 Performances

La définition des performances d'un contrôleur repose sur les notions de stabilité et de robustesse. Elles ont pour objectif de caractériser le comportement global du système "contrôleur-système contrôlé". Ces notions varient selon le type de système étudié. Si pour un système non linéaire, la notion de stabilité est implicitement au sens de Lyapunov, il n'en est pas de même pour les systèmes linéaires où plusieurs définitions de stabilités sont couramment utilisées. Toutefois, il est fréquent de considérer qu'un système linéaire est stable si et seulement si sa réponse à une impulsion (de type Dirac) tend vers zéro au bout d'un temps infini. Cette définition présente l'intérêt de restreindre l'étude de stabilité d'un système linéaire à celle de ses pôles. La robustesse d'un contrôleur renvoie à garantir la stabilité du système dans son ensemble vis-à-vis de perturbations extérieures ainsi que d'éventuelles erreurs de modélisation. Différentes techniques à mettre en œuvre pour la caractérisation des performances d'un contrôleur adaptatif (ou pas) sont décrites en annexe A.

Dans le cas d'un contrôleur adaptatif ces notions s'étendent aux boucles d'apprentissage. Ainsi, il est possible de définir une notion de stabilité d'apprentissage pour étudier la performance d'identification des paramètres du système contrôlé. Toutefois il est généralement nécessaire d'imposer des conditions relativement restrictives quand aux changements auxquels est sujet le processus piloté. La question de la convergence des mécanismes d'apprentissage est critique. Si comme nous l'avons vu précédemment pour certains types de contrôleurs adaptatifs (par exemple le contrôle adaptatif par surfaces glissantes), la convergence de l'apprentissage peut être formellement prouvée par une étude de stabilité au sens de Lyapunov, il est fréquent de recourir à la simulation pour apporter cette réponse de manière numérique pour d'autres schémas de contrôleurs adaptatifs (contrôle adaptatif par sélection de modèles, par planification de gains, etc.) et les combinaisons de ceux-ci (Tin et Poon, 2005).

Enfin il convient de ne pas perdre de vue que notre problématique a pour objectif de reproduire du moins partiellement certaines caractéristiques de la plasticité du contrôle sensorimoteur. La conception (structure et paramétrage) d'un contrôleur adaptif répond généralement à des contraintes directement ou indirectement liées à une stabilité et robustesse désirées du système global. De ce fait ces contraintes se doivent de présenter une cohérence "physiologique" avec les capacités réelles des mécanismes d'apprentissage sensorimoteur, requérant ainsi une lourde contribution expérimentale.

6.3.2 Analogies avec le contrôle sensorimoteur

Les différentes architectures de contrôles présentées précédemment sont relativement génériques et éclipsent une réalité bien plus diversifiée. Il est de même pour les techniques de mise en œuvre de ces schémas de contrôle (fonctions de transfert, réseaux de neurones, filtre de Kalman, modèles de Markov cachés, etc.). Ainsi le modélisateur dispose d'une multitude d'approches pour décrire la plasticité du système sensorimoteur. Une première étape dans la sélection d'un type de contrôleur est la catégorisation direct/indirect. L'approche indirecte aussi appelée explicite est basée sur un modèle du processus piloté dont les paramètres sont estimés en ligne. Une fois ces paramètres obtenus, ce sont ceux de la loi de commande qui sont calculés. A contrario, selon l'approche directe ou encore implicite, les paramètres de la loi de commande sont directement calculés à partir des signaux de consigne et d'observation du processus piloté. Ainsi aucun modèle du processus n'apparait de manière explicite dans le schéma de contrôle et c'est au niveau de la conception même du contrôleur que les connaissances du processus sont finalement intégrées. Il apparait donc que selon la stratégie d'adaptation employée par le système nerveux central (principalement la mise à jour de modèle interne et la modulation d'impédance, voir chapitre 5) correspondra l'une de ces deux classes de contrôleur adaptatif. Nous présentons à ce sujet un récapitulatif des différents schémas de contrôle proposés plus haut ainsi que de certaines analogies avec les propriétés du contrôle sensorimoteur (voir aussi tableau 6.1).

Gain Scheduling. Le contrôle par planification de gain est de la classe directe et s'apparente à la théorie du point d'équilibre (Merton, 1953, Feldman, 1966) énoncée au chapitre 4. Rappelons que selon cette théorie, le système nerveux central serait en mesure de contrôler la contraction et la relaxation des muscles afin de mouvoir un membre (par exemple la main) entre deux positions d'équilibre stables. Cette théorie repose en particulier sur les propriétés viscoélastiques des muscles (Merton, 1972). Un mouvement pourrait alors être programmé au niveau neuronal comme une séquence de gains décrivant l'évolution temporelle de la contraction des muscles impliqués dans le mouvement en question et dont la commutation entre deux valeurs successives serait continue.

High Gain Adaptive Control. Le contrôle adaptif par gains élevés est à l'instar du contrôle par la planification de gains une approche directe tirant bénéfice du caractère viscoélastique des muscles et de leur capacité de fonctionnement synergique au travers de la co-activation musculaire (voir chapitre 3). L'indexation des gains d'un contrôleur sur le niveau d'un signal d'erreur et le contrôle adaptatif par gains élevés s'apparente à la stratégie de modulation d'impédance (Hogan, 1984, Mussa-Ivaldi et al., 1985). En effet, nous avons vu

au chapitre 5 que la contraction simultanée de muscles et de leurs antagonistes respectifs avait la propriété d'accroitre à la fois la robustesse des membres en mouvement sans modifier la cinématique des trajectoires réalisées mais aussi la stabilité des membres immobiles.

Multi Model Adaptive Control. Le contrôle adaptatif par sélection de modèle est une méthode indirecte qui, comme nous l'avons vu précédemment ne présente pas de réelles capacités d'apprentissage. En effet, ses jeux de paramètres (modèles internes et régulateurs) sont figés et adaptés à un certain nombre fini de contextes identifiés au préalable. Toutefois cette approche présente un double intérêt. Le premier concerne l'identification de changement du contexte courant ainsi que la commutation sur un jeu de paramètres adéquats. Plusieurs études (Elkind et al., 1964) avaient permis de mettre en lumière les capacités de pilotes d'avions, entrainés à différents modes de fonctionnement de leur aéronef à reconnaître l'occurrence de ces modes et à basculer dans un mode de contrôle adapté, en quelques secondes seulement. Un second intérêt du contrôle adaptatif par sélection de modèle est de proposer une forme de mémorisation alors que dans les autres approches, un changement de contexte engendre un apprentissage qui entraine la disparition de ces connaissances.

Model Reference Adaptive Control. Tout comme le contrôle adaptatif par sélection de modèle, le contrôle adaptatif par modèle de référence est une approche indirecte qui possède deux propriétés intéressantes. Cela provient de l'entité qui sera considérée comme modèle de référence. Si le modèle de référence est une représentation interne du comportement global du système piloté attendu, alors ce sont les paramètres de la loi de commande qui sont modifiés. Le comportement du système «Homme-Machine » présente alors une certaine forme de constance, ce qui n'est pas sans rappeler le modèle $cross - over$ (citemcruer1962, McRuer et Krendel, 1974). Il serait alors possible d'expliquer ces observations expérimentales par une architecture de contrôle adaptatif par modèle de référence. Mais le choix du modèle de référence peut également porter sur le système piloté. Le contrôleur devenant alors un observateur du processus réel et permettant l'apprentissage de ses caractéristiques. Cette mise au point d'un modèle interne direct (voir chapitre 4) confère au système nerveux central des capacités de prédiction du comportement du processus piloté. Cette caractéristique est essentielle en particulier pour la détection de changements de l'environnement déclenchée par une incohérence entre prédiction et observation.

Feedback Error Learning, Adaptive Sliding Control. Ces deux approches directes combinent à la fois contrôle en boucle ouverte (par modèle

Méthode	Analogie
Gain Scheduling	Théorie du point d'équilibre
High Gain Adaptive Control	Modulation d'impédance
Multi Model Adaptive Control	Memorisation et commutation de modes de contrôle
Model Reference Adaptive Control	Modèle $cross - over$, apprentissage de modèles directs, prédiction
Adaptive Sliding Control	Contrôle boucle ouverte et boucle fermée, apprentissage de modèles inverses
Feedback Error Learning	Contrôle boucle ouverte et boucle fermée, apprentissage de modèles inverses

TABLE 6.1 – Analogies entre les schémas de contrôle adaptitif présentés et certaines propriétés du contrôle sensorimoteur.

interne inverse du système piloté) et contrôle en boucle fermée (par boucle de régulation classique). Cet apprentissage de la dynamique inverse d'un système simultané à son contrôle offre des similarités avec la stratégie d'adaptation par mise à jour de modèle interne (Held, 1965, Bhushan et Shadmehr, 1999). Par ailleurs, la mise en place d'un dispositif de modulation des paramètres de régulation de la boucle fermée permettait de rendre compte des deux principales stratégies d'adaptations (apprentissage et modulation d'impédance) dont l'exécution conjointe a été expérimentalement observée (Thoroughman et Shadmehr, 1999, Smith et al., 2006).

6.4 Conclusion

Nous avons au cours de ce chapitre présenté différentes approches pour la conception de contrôleurs adaptatifs. La validation formelle de ces différents schémas, tant au niveau de la stabilité, de la robustesse du contrôle que de la convergence des mécanismes d'apprentissage s'avère généralement lourde et contraignante sur la mise en place d'hypothèses, en particulier concernant les changements d'environnement. Il est alors fréquent de recourir à des outils numériques pour s'assurer de leur fonctionnement correct (attendu). Nous avons pu remarquer que ces différentes approches intègrent certaines caractéristiques du contrôle sensorimoteur observées expérimentalement. Cela permet d'orienter le modélisateur selon les propriétés qu'il souhaite prendre en compte. Le choix

des techniques mathématiques pour leur mise en œuvre se doit aussi d'être approprié au contexte de l'étude (gestion de bruits, d'incertitudes de mesures, de retard, etc.) et d'éviter autant que faire ce peu de conférer au contrôleur des propriétés non physiologiquement avérées. Il convient de plus d'établir deux niveaux de spécifications : le premier décrivant les caractéristiques globales, génériques des boucles d'apprentissage (vitesse de mise à jour, etc.), le second propre à la technique d'implémentation employée, dont des équivalences avec des méthodes concurrentes pourront être établies. En conclusion, la théorie du contrôle adaptif fournit un panel d'outils nous autorisant la mise en place de mécanismes adaptatifs au sein des modèles de conducteurs, présentant par ailleurs une certaine cohérence avec les observations expérimentales menées à ce sujet.

Deuxième partie

Modélisation et expérimentations

Chapitre 7

Méthodologie

Sommaire

7.1 Introduction 98
7.2 Méthodologie 98
7.2.1 Impact 98
7.2.2 Détection 100
7.2.3 Interprétation 100
7.2.4 Réaction 101
7.2.5 Performance 103
7.3 Application 103
7.3.1 Stratégies adaptatives 103
7.3.2 Contexte de l'étude 104
7.4 Conclusion 105

7.1 Introduction

Au regard des diverses informations collectées lors des recherches bibliographiques, nous allons au cours de ce chapitre clarifier voire reformuler notre problématique posée initialement. Pour ce faire, nous ne nous contenterons pas d'introduire un modèle de conducteur adaptif, modèle qui fera par ailleurs l'objet d'un chapitre spécifique (voir chapitre 8) mais nous nous emploierons à considérer une approche plus globale et générique, une méthodologie visant à faciliter pour le modélisateur, l'étude du comportement adaptatif des conducteurs. Ainsi, nous présenterons dans une première partie différents points d'intérêt que nous jugeons essentiels pour répondre à notre problématique. Puis dans une seconde partie, nous nous concentrerons sur la redéfinition de notre contexte de travail.

7.2 Méthodologie

L'étude du comportement du conducteur suite à une modification de la dynamique de son véhicule nécessite dans un premier temps d'analyser la manière dont l'événement à l'origine de ce changement va impacter le comportement du véhicule ainsi que celui du conducteur. Si le changement est détecté par ce dernier, la manière dont il sera interprété peut influer sur le choix des différentes réactions possibles du conducteur et donc sur la performance de la tâche de conduite. Ces différentes étapes sont regroupées dans l'organigramme présenté à la figure 7.1 et sont détaillées ci-après.

7.2.1 Impact

Comme nous l'avons déjà évoqué, nous nous plaçons dans le contexte où suite à un certain évènement, le comportement du véhicule que pilote le conducteur est modifié. Cet évènement peut avoir diverses origines. Il peut s'agir d'une défaillance matérielle ou logicielle, par exemple la rupture d'un organe mécanique ou encore le basculement d'un système embarqué dans un mode de refuge ou encore dégradé. Mais cela peut aussi provenir de la mise en place d'une stratégie d'assistance par un dispositif d'aide, n'ayant jamais été rencontrée auparavant par le conducteur et ne résultant donc pas d'une quelconque défaillance.

Quoiqu'il en soit, la première piste de réflexion que nous proposons porte sur la définition de l'impact de l'évènement :

- sur le véhicule,
- sur le conducteur.

Concernant l'impact sur le véhicule, il convient de définir en quoi l'évènement en question va modifier le comportement du véhicule. Cette implication n'est

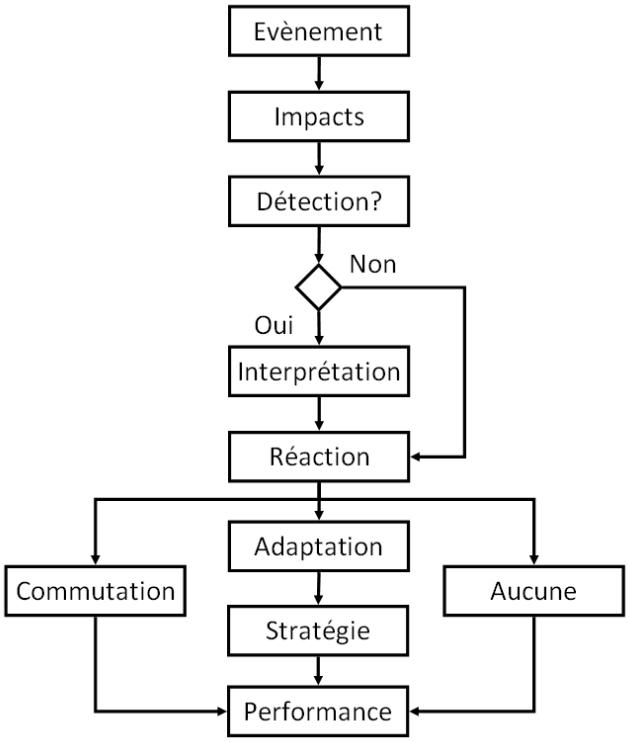


FIGURE 7.1 – Proposition d'aide à la modélisation pour l'étude de la réaction du conducteur à une modification du comportement de son véhicule.

pas systématiquement directe. Le dysfonctionnement d'un capteur de couple d'une direction assistée peut amener celui-ci à délivrer des informations incohérentes. Or, la logique intégrée à l'assistance de direction peut dans certains cas, détecter cette incohérence et basculer le système dans un mode refuge comme l'arrêt de toute assistance à la direction. Cette étape nécessite donc de disposer d'un maximum d'informations techniques sur les systèmes considérés et sur leurs interactions.

Les conséquences de l'évènement peuvent se révéler totalement transparentes pour le conducteur dans le sens où ce dernier peut ne pas les détecter. De ce fait, il convient dans un premier temps d'identifier quelles sont les modalités sensorielles susceptibles d'être stimulées par la modification de la dynamique du véhicule. Comme nous avons pu le découvrir au chapitre 3, les performances de celles-ci en termes par exemple de vitesse de transmission de l'information, de seuil de détection peuvent présenter des différences significatives. Cette démarche déductive est une étape rencontrée fréquemment dans de nombreuses

méthodes d'analyse de sûreté de fonctionnement (Zwingelstein, 1999, Aubry et Chatelet, 2008, Giraud, 2006).

7.2.2 Détection

La détection d'un changement du comportement dynamique du véhicule par le conducteur dépend en particulier de sa capacité à mesurer l'intensité d'un stimulus sensoriel. Cette aptitude varie selon chacun mais peut être mesurée et représentée par l'intermédiaire d'un seuil. Deux types de seuils peuvent être définis (Strandemar et Thorvald, 2004). Le seuil absolu représente l'intensité minimale d'un stimulus qui peut être détectée. Le seuil différentiel renvoie quant à lui à l'intensité nécessaire pour autoriser la discrimination de deux stimuli. Les seuils sensoriels dépendent comme nous avons pu le voir au chapitre 3, des limitations propres des récepteurs sensoriels et des voies de transmission de l'information, en particulier des bruits neuronaux. La mesure de ces seuils sous-entend une détection consciente d'un changement dans le sens où le sujet est dans la possibilité de la verbaliser. Lorsque l'on présente à un sujet une stimulation dont le niveau appartient au voisinage de ses seuils sensoriels, ce dernier peut aussi bien détecter un signal en réalité absent et inversement. Nous avons par exemple, au cours d'une expérimentation, soumis des conducteurs à des variations de retour de couple au volant. Ces variations d'efforts apparaissaient alors que les conducteurs se trouvaient en virage établi. La figure 7.2 illustre cette zone d'incertitude dans la détection du stimulus.

7.2.3 Interprétation

La détection d'une modification du comportement du véhicule n'implique pas systématiquement l'identification par le conducteur de ou des causes qui en sont à l'origine. Lorsque le changement de comportement est permanent et franc, le conducteur peut dans le meilleur des cas identifier le composant sujet à un dysfonctionnement ou du moins à un fonctionnement inattendu. Mais le conducteur peut, de par son niveau de connaissance et de sa propre expérience de conduite, se retrouver dans une situation de confusion, où la raison identifiée du changement de comportement est différente de celle qui en est effectivement responsable. Dans une telle situation, les implications sur la réaction du conducteur peuvent se révéler désastreuses. Ceci fût par exemple observé dans Deborne et al., 2008. Dans cette expérimentation sur le simulateur dynamique de conduite ULTIMATE, la perte de direction assistée fût simulée lors d'une conduite en virage. Après interrogation, seulement un sujet sur douze fût capable de relier l'évènement qu'il a rencontré avec une perte d'assistance de direction tandis que certains l'assimilèrent à d'autres évènements préalablement rencontrés dans leur propre expérience de conduite.

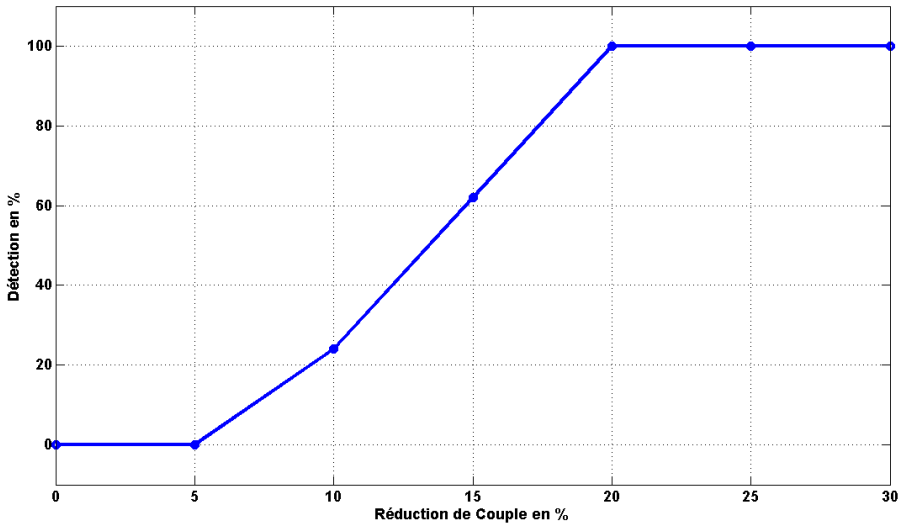


FIGURE 7.2 – Détection de variations de couple volant. Résultat pour un sujet, pour une conduite en virage à 70km/h avec un rayon de courbure de 250m et un effort moyen au volant de 3N.m. Le sujet a été soumis à des réductions d'amplitude différentes (avec répétition des valeurs) de couple dont la transition était de type créneau d'une durée de 250ms.

Cette question d'interprétation, d'identification de l'évènement ou de son origine est particulièrement importante quant au type de stratégies d'adaptation, sur lesquelles nous reviendrons plus loin, que le conducteur pourra mettre en place. En effet, nous avons vu au chapitre 5 qu'une solution à la disposition du système nerveux central pour faire face à un changement de son environnement réside en l'internalisation de ces modifications. Ainsi, il est possible que cette mise à jour ne s'applique pas aux paramètres réellement modifiés mais à d'autres ayant des effets confondants. Enfin, notons qu'en présence d'une modification sporadique, de courte durée et peu fréquente, il est envisageable que le conducteur ne tente pas d'en identifier les causes. L'évènement est alors assimilé à du bruit ou à une perturbation locale.

7.2.4 Réaction

Comme nous le proposons à la figure 7.1, il n'est pas nécessaire que le conducteur détecte de manière consciente un changement dans son environnement pour y répondre. En effet, nous avons pu voir au chapitre 5 que le système nerveux central est capable de s'adapter à de nouveaux environnements sans pour autant que le sujet en ait conscience : la modulation de l'impédance ap-

parente des membres ainsi que la mise à jour de la représentation interne du système manipulé peut s'avérer en partie ou totalement transparente aux yeux de l'opérateur qui l'utilise. Cette situation est potentiellement pernicieuse car l'opérateur se retrouve en décalage par rapport au système qu'il croit manipuler. Il convient donc dans une optique de modélisation mais aussi de sécurité de ne pas écarter les capacités plastiques des stratégies de contrôle des conducteurs dès lors qu'ils ne détectent aucun changement au niveau de leur véhicule.

La prise de conscience par le conducteur de l'occurrence d'un évènement ayant entraîné la modification du comportement de son véhicule peut l'amener à différentes manières d'y répondre. La première d'entre elles est la non réaction. Les niveaux de contrôle (ou de pilotage) et de manœuvre (Neboît, 1974) ne subissent aucune modification, le conducteur poursuit sa tâche de conduite, la robustesse de sa stratégie de contrôle se révélant suffisante pour ne pas mettre en place une action particulière. Cela peut se retrouver dans le cas de modifications transitoires où le comportement du véhicule recouvre rapidement son état antérieur à l'occurrence de l'évènement. L'éventuelle modification de trajectoire résultante est corrigée grâce aux boucles de rétroaction dans la stratégie de contrôle.

Une alternative à la non réaction consiste à stopper la tâche en cours d'exécution par le conducteur, voir la commutation de celui-ci dans un autre mode de conduite, mode de refuge lui permettant de répondre rapidement au changement de contexte. Par exemple, un éclatement de pneumatique survenant au début d'une phase de doublage peut contraindre le conducteur à se rabattre et rester sur sa voie. De même, il peut dans certains cas choisir de désactiver, lorsque cela est possible, un dispositif d'aide qui lui paraît inadapté au contexte courant. Par exemple, les systèmes de correction de trajectoire ESP (*Electronic Stability Program*) améliorent la capacité de contrôle du véhicule sur route enneigée en effectuant dans certains cas des micro-freinages au niveau des roues où le taux de glissement devient trop important. Mais cette logique peut s'avèrer problématique dans certaines situations comme lors de phases de démarrage du véhicule où le patinage des roues est inévitable. Le conducteur peut aussi prendre la décision de poursuivre la tâche en cours ainsi que la stratégie de contrôle utilisée mais en actualisant et redéfinissant les paramètres dont elle dépend. Cette solution se au centre de notre réflexion et sera en particulier développée plus loin.

7.2.5 Performance

Quelle que soit la manière dont le conducteur réagira aux changements de contexte qui lui seront proposés, il sera indispensable d'en quantifier l'impact sur sa performance de contrôle par l'intermédiaire de critères objectifs. L'enjeu étant de disposer de métriques offrant une réelle capacité de description de l'état de contrôle du conducteur dans sa tâche de conduite, voire de son évolution au cours du temps. Celles-ci doivent en particulier répondre à de nombreuses exigences telles que la tolérance aux variations naturelles de la stratégie de contrôle propre à chaque conducteur ainsi que la sensibilité au scénario de conduite présenté : la discrimination entre une variation due à une amélioration ou dégradation effective de la performance de contrôle et une variation naturelle s'avère nécessaire. Toutefois, de par la complexité de la tâche de conduite, il n'existe pas de métrique générale et le choix d'un indicateur ne peut se faire sans prendre en compte le contexte de la conduite (ces indicateurs sont présentés de manière non exhaustive, en annexe B).

7.3 Application

Nous présentons ci-dessous un rappel des différentes stratégies d'adaptation dont le conducteur, au travers de son système nerveux central, dispose ainsi que les spécifications de notre contexte d'étude au regard des points qui ont été évoqués précédemment.

7.3.1 Stratégies adaptatives

Le chapitre 5 a permit de mettre en lumière différentes stratégies qui autorisent le système nerveux central à contrer les changements de l'environnement avec lequel il interagit :

- la modulation de l'impédance apparente des membres impliqués,
- la mise à jour des représentations internes des systèmes manipulés.

Bien que les différentes stratégies d'adaptation identifiées présentent des caractéristiques qui leur sont propres, leurs champs d'action peuvent se recouvrir sans toutefois se confondre (Milner et franklin, 2005, Thoroughman et Shadmehr, 1999). Ceci est illustré à la figure 7.3. Il est évident que les zones de recouvrement présentent la difficulté supplémentaire de décrire la manière dont les différentes stratégies adaptatives peuvent interagir : leurs fonctionnements sont-ils autonomes et cloisonnés ou au contraire synergiques et supervisés par une même entité ?

Il convient donc d'analyser, avant toute tentative de modélisation, quelles sont les stratégies concernées par l'évènement en question. Cette étape est

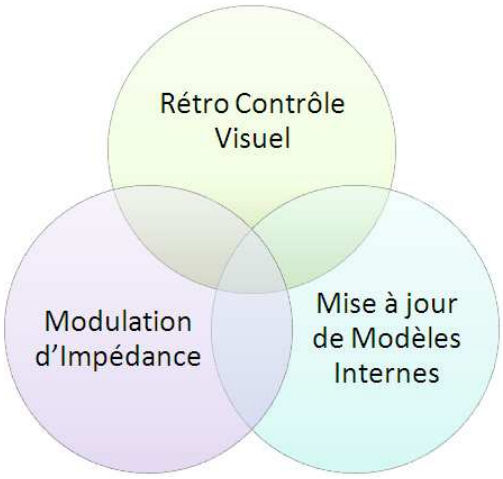


FIGURE 7.3 – Les différentes stratégies dont dispose un conducteur pour s'adapter à une modification de la dynamique de son véhicule peuvent se révéler redondantes. A chaque situation, il n'y a pas systématiquement unicité de la solution mise en place par le système nerveux central.

essentielle et permet en particulier d'apporter des éléments de réponse quant à l'approche ou au type de structure du modèle à employer. Par exemple, dans le cas d'un opérateur qui pilote un système au travers d'un joystick dépourvu de tout type de retour d'effort, il n'apparaît pas à priori nécessaire de conférer au modèle la stratégie de modulation d'impédance apparente des membres impliqués. De même, il est nécessaire de vérifier expérimentalement la faisabilité pour le système nerveux central d'internaliser les changements de contexte qui lui sont proposés afin de ne pas surévaluer les capacités conférées au modèle.

7.3.2 Contexte de l'étude

Impact. Nous nous plaçons dans le contexte général du contrôle de la position d'un système dans son environnement par l'intermédiaire d'une interface dotée de retour d'effort. Nous choisissons comme évènement perturbateur la modification soudaine du niveau d'effort restitué (avec un profil de transition de type échelon). L'application au contexte de la conduite est une brusque variation du couple au niveau du volant. Cet évènement intervient alors que le conducteur se trouve en situation de virage établi. Cet évènement stimule les voies proprioceptives. Nous supposons que celles-ci permettent l'estimation du couple volant ainsi que la position angulaire de celui-ci. Nous écartons la possibilité d'utilisation de la modalité visuelle pour l'estimation de cette seconde valeur : nous considérons que cette modalité est dédiée au contrôle de la trajectoire du véhicule sur la voie.

Détection. Nous choisissons des variations soudaines du niveau d'effort restitué. Ces variations sont de l'ordre du double ou du triple du niveau nominal. Ainsi, nous admettons pour cette perturbation une détection consciente et immédiate pour le contexte de la conduite car celle-ci intervient en virage établi où le niveau d'effort au volant est important.

Interprétation. D'un point de vue contrôle, nous émettons l'hypothèse que la structure de la stratégie du conducteur intègre une représentation interne du système manipulé et qu'il identifie quels éléments ont été l'objet de la modification. D'un point de vue subjectif, cette information ne sera disponible qu'après la conduite d'expérimentations et interrogations des sujets.

Réaction. Nous supposons que le conducteur poursuit sa tâche de conduite initiale. De plus, nous admettons qu'il ne changera pas de stratégie de conduite. Ainsi, nous invoquons la mise en place de stratégies adaptatives. L'évènement perturbateur modifie le niveau d'effort à fournir au restituteur pour atteindre la consigne désirée. De ce fait, nous intégrons au modèle les capacités de mise à jour de modèle interne ainsi que la modulation d'impédance apparente des membres. Nous supposons que le conducteur possède des représentations internes dont la structure est fixe et qu'il identifie le ou les paramètres à mettre à jour. Chacune des stratégies adaptatives pouvant fonctionner indépendamment l'une de l'autre.

Performance. L'évaluation de la performance de contrôle portera sur le suivi de la consigne de trajectoire ainsi que sur la stabilité et la convergence des processus d'adaptation si toutefois elles sont observées expérimentalement.

7.4 Conclusion

Nous avons présenté au cours de ce bref chapitre différentes pistes de réflexion visant à assister le modélisateur dans la définition du périmètre de validité du modèle de conducteur ainsi que le choix de ses caractéristiques. Il peut en particulier se révéler nécessaire de vérifier au préalable les limites de performances des stratégies adaptives retenues. Par ailleurs, nous avons également posé certaines hypothèses afin de préciser notre contexte d'étude et ainsi le périmètre de validité du modèle que nous présenterons au chapitre 8. Certaines de ces hypothèses seront reprises et étendues selon le contexte en question. Nous décrirons par la suite deux expérimentations dont l'objet est l'adaptation sensorimotrice et où nous appliquerons notre modèle afin d'apporter certaines informations quand aux capacités adaptatives des conducteurs.

Enfin, nous étendrons notre réflexion à d'autres champs d'application de ce modèle.

Chapitre 8

Modèle adaptatif de conducteur

Sommaire

8.1 Introduction 108
8.2 Contexte et hypothèses 108
8.3 Implémentation 110
8.3.1 Anticipation-prédiction 110
8.3.2 Système neuromusculaire 113
8.4 Composants adaptatifs 116
8.4.1 Mise à jour de modèle interne 116
8.4.2 Modulation d'impédance 119
8.5 Tests préliminaires 123
8.6 Conclusion 128

8.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre un modèle de comportement conducteur pour la tâche de contrôle latéral du véhicule. Ce modèle est adaptatif dans le sens où il est muni de capacités de réaction actives face à des modifications du contexte de la tâche pour lequel il est initialement développé. Nous présentons alors les hypothèses principales sur lesquelles se fonde notre approche puis détaillons au lecteur la formalisation du modèle. Cette seconde partie fera également l'objet de propositions d'hypothèses plus spécifiques qu'il nous a semblé, dans un souci de clarté, préférable d'aborder ultérieurement, lorsque le besoin s'avérera nécéssaire.

8.2 Contexte et hypothèses

Le contexte général de notre étude concerne les réactions du conducteur face à l'occurrence de modifications du comportement de la dynamique du volant lors d'une conduite en virage établi.

Tâche de conduite

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, la complexité de la tâche de conduite engendre une grande diversité de modèles de conducteurs décrivant le niveau de pilotage de la conduite et ce pour des contextes spécifiques. Du fait de notre choix d'étudier le comportement des conducteurs lors de la conduite en virage établi, nous nous orientons alors vers les modèles de contrôle latéral du véhicule. A la différence de certains auteurs, nous nous écartons d'un schéma de contrôle où position latérale et vitesse longitudinale du véhicule sont régulées pour nous concentrer sur la première de ces deux tâches. De ce fait, nous supposons que le conducteur évolue à vitesse constante tout au long du virage.

Evénement véhicule

Nous nous intéressons ici à des modifications de comportement du système volant. Sous cette dénomination, nous regroupons les différents composants mécaniques tels que le volant, la colonne de direction et le dispositif d'assistance(qu'il soit électrique ou hydraulique) mais aussi toute la logique décrivant les lois d'assistance. Une particularité d'un tel système à l'instar d'un système ABS et contrairement à un régulateur de vitesse est de ne pouvoir être déconnecté volontairement. En situation conflictuelle voire critique, le conducteur ne peut désactiver l'action de celui-ci et est finalement contraint de coopérer. Une modification du comportement du système volant peut avoir différentes origines. Ceci peut résulter d'une défaillance d'un élément ou du système tout

entier basculant dans un mode dégradé. Ce changement de comportement peut aussi résulter d'un fonctionnement nominal du système mais inconnu jusque là du conducteur. Nous pouvons par exemple imaginer des lois de commande qui s'adaptent au contexte courant de conduite. Ceci est d'autant plus pertinent du fait du développement des technologies SbW ($Steer - by - Wire$) où il est possible de découpler complètement le comportement du volant du reste du véhicule de par l'absence de liaison mécanique.

Schéma de contrôle et mécanismes adaptatifs

Une caractéristique essentielle de la conduite que nous retrouvons en particulier dans le contrôle latéral de la trajectoire du véhicule est l'anticipation/prédiction (voir chapitre 2). Pour rappel, celle-ci décrit la capacité des conducteurs à réguler non pas l'état courant du véhicule mais son évolution à un horizon de temps déterminé. Par ailleurs, le choix d'étudier les effets de modifications de comportement du volant nous impose d'intégrer au modèle une description de l'interaction du conducteur avec cette interface. Nous nous orientons alors vers une architecture à deux étapes, similaire à celle que nous trouvons dans Toffin et al., 2007. Ainsi, le modèle fonctionne en deux temps : tout d'abord une consigne d'angle volant est établie à partir d'informations courantes et d'extrapolations faites à partir de celles-ci puis la réalisation de cette consigne par le système neuromusculaire, vu alors comme un actionneur agissant sur le volant. C'est au sein de cette seconde étape qu'apparaît explicitement l'interaction avec le volant où nous nous proposons d'intégrer les stratégies adaptatives identifiées au chapitre 5. La figure 8.1 illustre l'architecture générale retenue.

Déclenchement des mécanismes adaptatifs

Nous supposons que les mécanismes de mise à jour de modèle interne et de modulation d'impédance (voire chapitre 5) se déclenchent de manière autonome lorsque les signaux d'erreurs les alimentant dépassent un certain seuil. Nous écartons la possibilité de forcer ces mécanismes par des instances cognitives supérieures. La plasticité du conducteur ne résulte donc pas directement d'un acte volontaire si ce n'est le respect de la consigne de suivi de trajectoire intrinsèquement liée à la structure de la boucle de contrôle. Par ailleurs, nous nous réservons la possibilité d'empêcher la mise en œuvre de tels mécanismes.

Interaction entre mécanismes adaptatifs

Comme nous avons pu le voir au chapitre 5, le système nerveux central dispose de différentes stratégies adaptatives dont la mise en œuvre peut être tant exclusive que simultanée. A l'instar de la manière dont les mécanismes

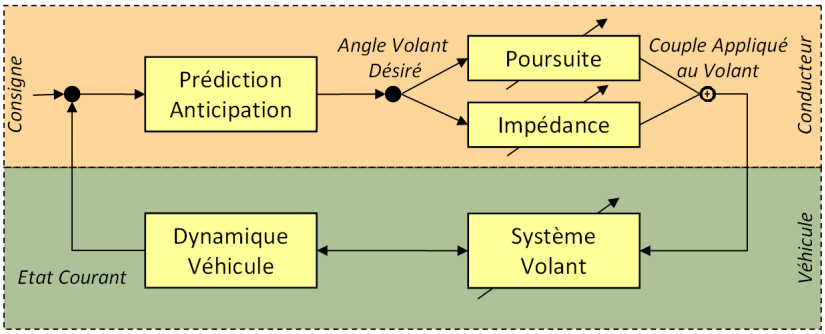


FIGURE 8.1 – Architecture générale retenue pour le modèle de conducteur. L'étape de prédiction/anticipation détermine l'angle nécessaire à appliquer au volant en fonction de l'état courant et à venir du véhicule. L'étape contrôle moteur décrit la réalisation de cette consigne c'est à dire l'interaction mécanique entre le conducteur et le volant. Le couple total appliqué par le conducteur sur le volant provient à la fois du couple de poursuite (nécessaire pour atteindre la position angulaire désirée) et d'impédance (caractérisant les propriétés musculo-squelettiques du conducteur). Ces deux sources de couple sont sujettes à des mécanismes adaptatifs.

adaptatifs sont déclenchés, leur fonctionnement est volontairement rendu autonome : du fait du manque d'indices expérimentaux, nous écartons la possibilité de l'existence d'un superviseur chargé de choisir la manière de faire fonctionner les différentes stratégies identifiées de façon synergique.

8.3 Implémentation

8.3.1 Anticipation-prédiction

Si le comportement anticipatif/prédictif des conducteurs fait aujourd'hui l'unanimité comme nous avons pu le voir au chapitre 2, les approches divergent sur la manière de traduire celui-ci sous forme mathématique. Si l'implémentation de l'anticipation et de la prédiction est généralement issue de la théorie de la commande prédictive (Ungoren et Peng, 2005, McAdam, 1981) ou du contrôle linéaire quadratique (Peng et Tomizuka, 1991, Sharp et Valtetsiotis, 2001), certains auteurs comme Toffin et Reymond (Toffin et al., 2007) ou encore Pick et Cole (Pick et Cole, 2008) proposent une approche basée sur une extrapolation de la trajectoire du véhicule à partir d'informations issues du flux visuel. Nous allons alors détailler cette dernière technique que nous avons décidé d'intégrer au modèle.

Ce premier module du modèle a pour objectif de déterminer quelles actions appliquer au volant afin d'assurer le suivi par le véhicule de la trajectoire désirée. Il peut alors être décomposé en deux étapes successives. Dans un premier temps, le conducteur estime son écart à l'horizon Tp de la consigne qu'il souhaite suivre. Cette consigne est exprimée ici par un écart d_{Desire} décrivant alors la distance à laquelle le conducteur souhaite rouler de la trajectoire de référence. La valeur réelle de cet écart étant notée d, le conducteur évalue alors l'écart à la consigne $d(t+Tp) - d_{Desire}(t+Tp)$. Une fois cette quantité estimée, le conducteur doit la traduire dans un langage compatible avec les interfaces du véhicule, ici une position angulaire du volant. Nous faisons alors l'hypothèse que le conducteur dispose d'une représentation interne de la dynamique latérale du véhicule lui autorisant une telle action.

Cette approche repose sur l'enchaînement de deux étapes successives, la première étant une prédiction de la position latérale du véhicule sur la voie à l'horizon de temps Tp et la seconde la détermination de l'angle volant nécessaire à la correction de cette trajectoire. La trajectoire à l'instant t servant de référence au conducteur est appelée $y_{Ref}(t)$. Nous supposons que cette trajectoire de référence est identique, à une constante près, au profil de la route sur laquelle la conduite a lieu. La position latérale du véhicule est notée y_{Veh} et exprimée dans le repère mobile lié à la trajectoire de référence. A l'instant $t + Tp$, y_{Veh} est estimée à partir d'indices issus du flux optique à l'instant t et prend la forme d'un développement de Taylor du second ordre (voir équation 8.1).

$$y_{Veh}(t + Tp) \approx y_{Veh}(t) + Tp.\frac{dy_{Veh}}{dt}(t) + \frac{Tp^2}{2}.\frac{d^2y_{Veh}}{dt^2}(t) \tag{8.1}$$

Nous appelons écart sur la voie la différence entre y_{Veh} et y_{Ref}. Toutefois, du fait de la courbure de la route, la trajectoire de référence y_{Ref}, exprimée dans le repère mobile à l'instant t, varie entre les instants t et $t + Tp$ (voir figure 8.3.1). En notant d la fonction représentant l'écart entre la position du véhicule et la trajectoire de référence, nous avons :

$$d(t) = y_{Veh}(t) - y_{Ref}(t) \tag{8.2}$$

Et donc :

$$d(t + Tp) = y_{Veh}(t + Tp) - y_{Ref}(t + Tp) \tag{8.3}$$

La fonction y_{Ref} doit donc être connue. Dans le cas d'une conduite en virage établi, il est possible de prédire la valeur de celle-ci à l'instant $t + Tp$. A partir de la figure 8.3.1, nous déduisons l'équation 8.4.

$$y_{Ref}(t + Tp) = R_{Ref}.(1 - cos(\theta_{Ref})) \tag{8.4}$$

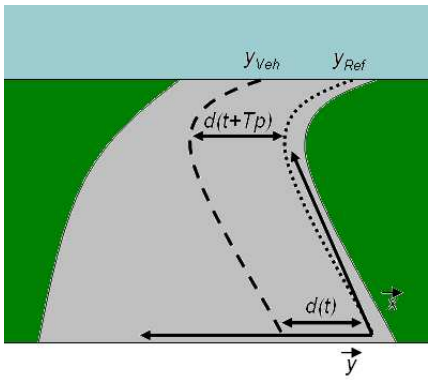


FIGURE 8.2 – Evolution de la trajectoire du véhicule (tirets) du conducteur et celle de référence (pointillés) entre les instants t et $t + Tp$.

En nous plaçant en régime permanent, la vitesse de lacet est supposée constante :

$$\frac{d\theta_{Veh}}{dt} = \frac{V}{R_{Veh}} \tag{8.5}$$

Soit :

$$\theta_{Veh} = Tp.\frac{V}{R_{Ref}} \tag{8.6}$$

Or géométriquement nous avons :

$$R_{Veh}.sin(\theta_{Veh}) = R_{Ref}.sin(\theta_{Ref}) \tag{8.7}$$

Nous faisons alors les hypothèses supplémentaires suivantes :

$$R_{Veh} \approx R_{Ref} \tag{8.8}$$

Et :

$$\theta_{Veh} \approx \theta_{Ref} \tag{8.9}$$

Ces dernières approximations se justifient par le fait que la distance entre la trajectoire du véhicule et la trajectoire de référence est de l'ordre du mètre généralement alors que les rayons de courbure sont dans notre cas supérieurs à 50m. Nous avons pu estimer numériquement l'erreur systématique engendrée par ces approximations. Pour des plages de vitesse de véhicule s'étendant de 50 à 110km/h, pour des virages de rayons compris entre 50 et 250m et enfin pour un horizon de prédiction de 0.1 à 2s, le niveau d'erreur dû aux approximations n'excède pas 5%. Nous obtenons au final :

$$d(t+Tp) \approx y_{Veh}(t) + Tp.\frac{dy_{Veh}}{dt}(t) + \frac{Tp^2}{2}.\frac{d^2y_{Veh}}{dt^2}(t) - R_{Ref}.(1 - cos(Tp.\frac{V}{R_{Veh}})) \tag{8.10}$$

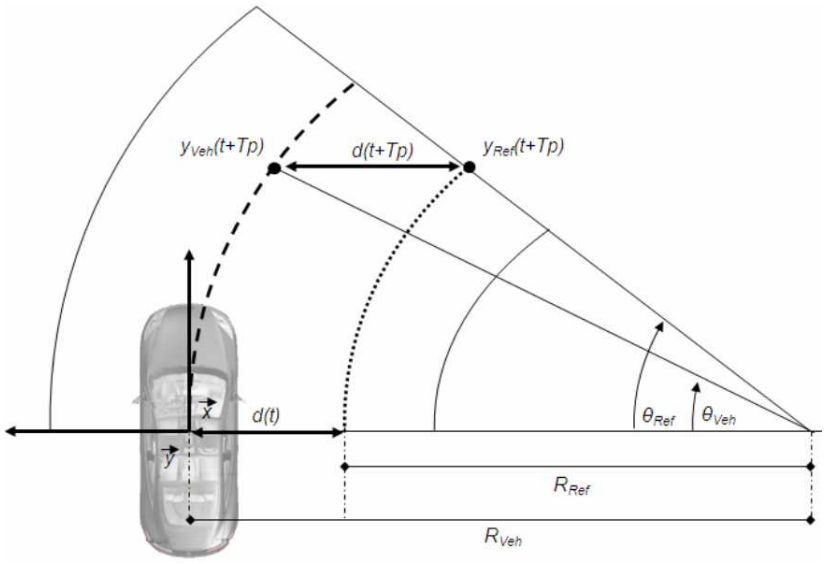


FIGURE 8.3 – Evolution de la trajectoire du véhicule du conducteur et celle de référence entre les instants t et $t + Tp$.

En choisissant comme trajectoire de référence la trajectoire parallèle au profil de la route et centrée sur le véhicule, une conduite idéale reviendra alors à maintenir la fonction d à un niveau nul.

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, l'acquisition des informations sensorielles (provenant ici du flux optique) n'est pas immédiate. De plus, leur traitement dans le but d'estimer $d(t + Tp)$ puis $\theta_{Desire}(t)$ requiert également du temps de la part du sytème nerveux central. Ces différents retards dans l'établissement de la consigne d'angle volant à appliquer sont regroupés sous la dénomination globale $T_{Perception}$. Ce temps est alors fixé à 100ms (voir chapitre 3).Nous en déduisons alors, d'après Toffin et al., 2007 que la correction d'angle à apporter au volant θ_{Dsir} en fonction de l'écart futur du véhicule sur la voie est de la forme :

$$\theta_{Desire}(t) = \frac{2.L.Kdemul}{Tp^2.V_{Veh}^2}.e^{-s.T_{Perception}}.d(t + Tp) \tag{8.11}$$

Les différentes caractéristiques du module de prédiction/anticipation du modèle de conducteur sont répertoriées au sein du tableau 8.1.

8.3.2 Système neuromusculaire

La production d'une force par un muscle sous l'excitation des motoneurones-α n'est pas immédiate et possède une dynamique qui lui est propre (voir chapitre 3). Cette dynamique musculaire, relation entre l'arrivée de la consigne de

Type	Nom	Description	Gamme de valeurs
entrée	d_{Desire}	Consigne d'écart latéral	Non contraint
	y_{Veh}	Position latérale du véhicule	Non contraint
	$\frac{dy_{Veh}}{dt}$	Vitesse latérale du véhicule	Non contraint
	$\frac{d^2y_{Veh}}{dt^2}$	Accélération latérale du véhicule	Non contraint
sortie	θ_{Desire}	Angle volant à appliquer	Butées matérielles
paramètre	Tp	Horizon de prédiction	De 0.1 à 3s
	L	Empattement du véhicule	De l'ordre de 2.8m
	$Kdemul$	Facteur de démultiplication	De 12 à 18
	V_{Veh}	Vitesse longitudinale	De 50 à 130km/h
	$T_{Perception}$	Temps de traitement du conducteur	De l'ordre de 100ms

TABLE 8.1 – Récapitulatif des entrées-sorties-paramètres du module de prédiction/anticipation.

force au niveau des unités motrices et la génération de celle-ci, est modélisée par un système du premier ordre inspiré des travaux de Winter (Winter, 1990) dont l'expression dans le formalisme de Laplace est décrite par l'équation 8.12.

$$H_{Muscle}(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \tag{8.12}$$

La pulsation de coupure de cette fonction de transfert ω_c est fixée à 30 rad/s (Pick et Cole, 2008) ce qui équivaut à une fréquence de coupure de l'ordre de 5Hz.

Couple de poursuite

La composante poursuite du module sensorimoteur a pour fonction de produire le niveau de couple juste suffisant pour actionner le volant et lui faire atteindre la position désirée par le conducteur. Nous posons alors les hypothèses suivantes. Nous supposons que le conducteur dispose d'une représentation interne de la dynamique responsable du couple remonté au volant. Cette dynamique est assimilée à un système masse-ressort-amortisseur, le conducteur est alors supposé posséder un modèle interne équivalent. Ce modèle direct lui autorise de pouvoir comparer à tout instant la réponse réelle du système avec celle prédite par son modèle interne. Toutefois, pour le calcul du couple à produire en fonction de la position angulaire voulue du volant, nous nous plaçons en régime stationnaire. Dans un tel état, le volant est fixe, immobile et par conséquent seule la "raideur" du système volant est source de couple. Nous supposons alors que seule la représentation interne de cette raideur est utilisée

pour générer le couple à appliquer au volant. Nous obtenons donc l'équation 8.13.

$$\Gamma_{Poursuite} = \hat{K}_{Volant}.\theta_{Desire} \tag{8.13}$$

Notons que la durée entre l'établissement d'une consigne d'angle volant et l'excitation des muscles concernés pour la production du niveau de couple désiré n'est pas nulle. Toutefois, nous incluons ce retard dans le temps de perception défini dans le module prédiction/anticipation.

Couple d'impédance

Nous avons vu lors des chapitres précédents que le système neuromusculaire présente des caractéristiques qui confèrent aux membres une certaine élasticité apparente. La première source d'élasticité provient des propriétés des tissus musculaires : tendons, fibres musculaires et ponts glissants formés par les filaments d'actine et de myosine. Leur réponse à une excitation est très rapide et souvent considérée comme instantanée.

La seconde source d'élasticité provient du réflexe d'étirement. Cette boucle de régulation de la longueur des fibres musculaires réagit à des perturbations extérieures à celle-ci. Cet asservissement à une longueur d'étirement désirée dont le niveau d'excitation est assuré par les motoneurones-α associés a pour effet de générer des efforts de rappel tel un ressort autour d'une certaine position d'équilibre. Toutefois, cette réaction n'est pas instantanée du fait de l'échange d'informations entre les fibres musculaires et les centres nerveux situés au niveau de la mœlle épinière. Ce temps de réponse du réflexe d'étirement est estimé de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes (typiquement 30-40ms). Cette élasticité ne résulte toutefois que des unités motrices impliquées dans le mouvement.

La troisième possibilité pour augmenter la raideur d'un membre est de recruter de nouvelles unités motrices non prévues initialement, par la co-activation des muscles agonistes et antagonistes. Notons que cette troisième composante de la raideur apparente des membres fait intrinsèquement intervenir les deux premières énoncées plus haut. La co-activation des muscles est commandée par le système nerveux central et n'est alors effective qu'après une centaine de millisecondes.

Pick et Cole proposent une description du système neuromusculaire intégrant ces différentes sources de raideur et de viscosité (Pick et Cole, 2008). Cependant, il est difficile d'identifier précisément les apports de chacune d'entre

elles dans le comportement global observé (Kearney et Hunter, 1988, Bennett, 1994, Hore et al., 1990). De ce fait, nous nous intéresserons uniquement à l'impédance globale que le conducteur exerce sur le volant. Les raideur et viscosité globales du conducteur sont alors définies respectivement par les termes $K_{Impedance}$ et $B_{Impedance}$. Suite à une perturbation au niveau de la position du volant, le conducteur exerce alors une force de rappel ayant pour effet de déplacer la position courante $\theta_{Courant}$ du volant vers sa position initiale désirée θ_{Desire}. Nous faisons alors les hypothèses que ce couple $\Gamma_{Impedance}$ au niveau du volant est généré immédiatement par le conducteur et est linéaire par rapport à la variation de position angulaire du volant (Pick et Cole, 2005). Nous obtenons alors, dans le formalisme de Laplace l'équation 8.14.

$$\frac{\Gamma_{Impedance}(s)}{\theta_{Courant}(s) - \theta_{Desire}(s)} = -K_{Impedance} - s.B_{Impedance} \tag{8.14}$$

Notons β le vecteur de paramètres regroupant raideur et viscosité apparentes. Soit e la mesure d'écart entre position angulaire courante et désirée, $e = \theta_{Courant} - \theta_{Desire}$ et $E_{Impedance}$ le vecteur composé de e et de sa dérivée par rapport au temps, nous obtenons comme équation équivalante à 8.14 :

$$\Gamma_{Impedance} = \beta^T.E_{Impedance} \tag{8.15}$$

Avec

$$\beta = \begin{bmatrix} K_{Impedance} \\ B_{Impedance} \end{bmatrix}$$

et

$$E_{Impedance} = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}$$

.

Le tableau 8.2 récapitule les différents paramètres, entrées et sorties du module d'interaction sensorimotrice, dénué de toute capacité adaptative.

8.4 Composants adaptatifs

Nous présentons ci-dessous une manière d'implémenter des capacités adaptatives aux composants du module d'interaction sensorimotrice.

8.4.1 Mise à jour de modèle interne

Notre problématique concerne ici la mise à jour du modèle interne direct de la dynamique du système volant présent dans le module d'interaction sensorimotrice et nécessaire à l'établissement du couple de poursuite $\Gamma_{Poursuite}$. Nous avons vu au chapitre 6 que la technique MRAC (contrôle adaptatif par modèle

Type	Nom	Déscription	Gamme de valeurs
entrée	θ_{Desire}	Position consigne d'angle volant	Non contraint
	$\theta_{Courant}$	Position courante d'angle volant	Butées matérielles
sortie	$\Gamma_{Poursuite}$	Couple de poursuite	Limites physiologiques
	$\Gamma_{Impedance}$	Couple d'impédance	Limites physiologiques
paramètre	$\hat{K}_{Volant}$	Estimation de la raideur du volant	Non contraint
	$K_{Impedance}$	Raideur apparente du conducteur	De 0 à 150N.m/rad
	$B_{Impedance}$	Viscosité apparente du conducteur	De 0 à 5N.m/rad/s
	ω_c	Pulsation de coupure des muscles	De l'ordre de 30rad/s

TABLE 8.2 – Récapitulatif des entrées-sorties-paramètres du module d'interaction sensorimotrice, sans capacités adaptatives.

de référence) peut assurer cette fonction. En effet, un tel contrôleur peut être transformé en un observateur et ce en échangeant simplement les rôles du système de référence et du système piloté. Ainsi, les paramètres du modèle interne direct du système volant peuvent être ajustés grâce à l'observation des entrées et sorties de ce même système.

Nous choisissons comme critère de coût J à minimiser le carré de l'erreur $E_{Poursuite}$, écart entre la position angulaire courante $\theta_{Courant}$ du volant et la prédiction $\hat{\theta}_{Courante}$ fournie par le modèle interne. Les paramètres de ce modèle interne sont alors regroupés sous le vecteur α. Nous avons alors

$$E_{Poursuite} = \theta_{Courant} - \hat{\theta}_{Courante} \tag{8.16}$$

$$J(\alpha) = \frac{1}{2}.E^2_{Poursuite} \tag{8.17}$$

Nous prenons comme loi d'ajustement la loi MIT décrivant finalement une descente de gradient :

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\gamma_{Poursuite}.\frac{\partial J(\alpha)}{\partial \alpha} \tag{8.18}$$

Le scalaire $\gamma_{Poursuite}$ décrit la vitesse de ce processus de mise à jour (voir figure 8.4). Ainsi une valeur nulle de ce paramètre rendra le modèle interne complètement statique et donc incapable d'intégrer toute modification du système volant. Par ailleurs, nous définissons le seuil $r_{Poursuite}$, en deçà duquel le mécanisme d'ajustement ne sera pas déclenché malgré un niveau d'erreur $E_{Poursuite}$ non nul. Des équations 8.17 et 8.18, la loi d'ajustement devient :

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\gamma_{Poursuite}.E_{Poursuite}.\frac{\partial E_{Poursuite}(\alpha)}{\partial \alpha} \tag{8.19}$$

Il convient alors d'expliciter la relation 8.19. Pour cela, nous raisonnerons à l'aide du formalisme de Laplace. Nous supposons que le conducteur dispose

d'une représentation interne du système volant de structure identique à celle du système réel. Le conducteur a donc, par l'expérience, internalisé un système masse-ressort-amortisseur. Comme dans notre approche seule la raideur du système volant est modifiée, nous émettons l'hypothèse que seule la représentation interne de celle-ci est mise à jour. En posant $C_{Conducteur}$ le couple global produit par le conducteur (regroupant ainsi les couples de poursuite et d'impédance), nous avons :

$$\frac{\theta_{Courant}}{C_{Conducteur}} = \frac{1}{J_{sv}.s^2 + B_{sv}.s + K_{sv}} \tag{8.20}$$

$$\frac{\hat{\theta}_{Courante}}{C_{Conducteur}} = \frac{1}{\hat{J}_{sv}.s^2 + \hat{B}_{sv}.s + \hat{K}_{sv}} \tag{8.21}$$

Où J_{sv}, B_{sv} et K_{sv} représentent respectivement l'inertie, l'amortissement et la raideur du système volant et $\hat{J}_{sv}$, $\hat{B}_{sv}$ et $\hat{K}_{sv}$ leurs représentations internes. La loi d'ajustement devient alors :

$$\frac{d\hat{K}_{sv}}{dt} = -\gamma_{Poursuite}.E_{Poursuite}.\frac{C_{Conducteur}}{(\hat{J}_{sv}.s^2 + \hat{B}_{sv}.s + \hat{K}_{sv})^2} \tag{8.22}$$

En multipliant par $\frac{C_{Conducteur}}{C_{Conducteur}}$ nous obtenons enfin :

$$\frac{d\hat{K}_{sv}}{dt} = -\gamma_{Poursuite}.E_{Poursuite}.\frac{\hat{\theta}^2_{Courante}}{C_{Conducteur}} \tag{8.23}$$

Nous remarquons que dans cette expression apparaît l'inverse du couple produit par le conducteur, qui, s'il s'annule, rend impossible tout processus de mise à jour des paramètres du modèle interne. Il est à noter que ce résultat provient du choix de la loi d'ajustement qui dans notre contexte n'est peut-être pas parfaitement adaptée. Toutefois, il convient de s'interroger sur la signification et les conséquences d'une annulation du couple conducteur. En effet, l'apprentissage de la dynamique du système volant ne peut être réalisé que lorsque ce système est stimulé. Les volants sont des systèmes dits neutres car leur position centrale correspond à une orientation des roues et une remontée de couple nulles. Lors d'une conduite en ligne droite, sans dissymétrie de glissement entres les roues gauches et droites, sans vent latéral, etc., il est impossible au conducteur d'estimer la raideur du volant. Nous avons pu tester avec succès d'autres lois d'ajustement (voir équation 8.24), établies par exemple de manière plus empirique.

$$\frac{d\hat{K}_{sv}}{dt} = -\gamma_{Poursuite}.E_{Poursuite}.C_{Conducteur} \tag{8.24}$$

Il n'est pour le moment pas établi de loi d'ajustement physiologiquement plausible. De ce fait, le choix d'une loi par le modélisateur peut être dicté par différents critères, que ce soit pour garantir la stabilité du processus d'adaptation (par des fonctions de Lyapunov par exemple), par simplicité de calcul,

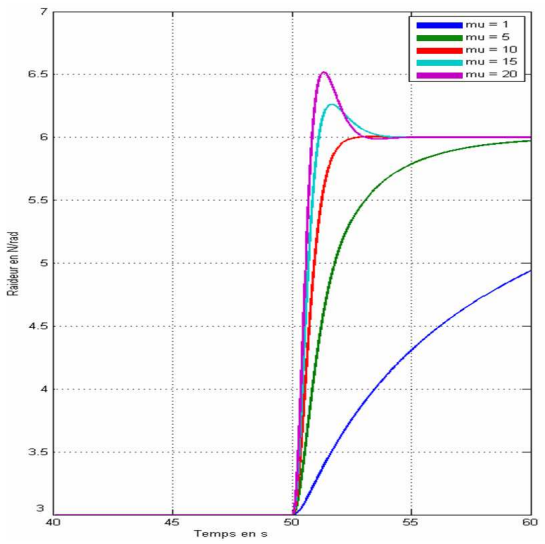


FIGURE 8.4 – Influence de la vitesse d'apprentissage sur l'estimation de la raideur du système volant. La conduite est réalisée en virage établi, la raideur du volant passe brusquement de 3 à 6N.m/rad. Les courbes figurant ci-dessus représentent la valeur de l'estimation de cette raideur par le conducteur. Du choix de la vitesse d'apprentissage dépendra la capacité à internaliser plus ou moins rapidement les changements de contextes. Nous observons avec cet exemple une difficulté courante avec l'approche MRAC : des choix de vitesses d'apprentissage trop élevées peuvent être sources d'oscillations et donc d'instabilités mais doivent être suffisantes pour répondre au signal d'excitation.

etc. Pour récapituler, le tableau 8.3 présente les différentes entrées, sorties et paramètres du mécanisme d'adaptation. Par ailleurs, la stratégie de mise à jour du modèle interne de la dynamique du système volant suit les règles suivantes :

- Si $|E_{Poursuite}| \leq r_{Poursuite}$ alors $\frac{d\hat{K}_{sv}}{dt} = 0$
- Si $|E_{Poursuite}| > r_{Poursuite}$ alors $\frac{d\hat{K}_{sv}}{dt} = -\gamma_{Poursuite}.E_{Poursuite}.\frac{\hat{\theta}^2_{Courante}}{C_{Conducteur}}$

8.4.2 Modulation d'impédance

La modulation d'impédance réside en partie dans le recrutement supplémentaire d'unités motrices (des muscles agonistes et antagonistes) venant se joindre aux unités déjà en action. La vitesse avec laquelle cette modulation opère n'est pas à notre connaissance clairement établie. Pour autant, cette donnée est indispensable quant à la proposition d'un modèle de modulation d'impédance offrant un comportement dont les caractéristiques soient physiologiquement

Type	Nom	Déscription	Gamme de valeurs
entrée	$C_{Conducteur}$	Couple total du conducteur	Limites physiologiques
	$\theta_{Courant}$	Position courante d'angle volant	Butées matérielles
sortie	$\hat{K}_{sv}$	Estimation raideur volant	Non Contraint
paramètre	$\hat{K}_{sv}$	Estimation raideur volant	Non Contraint
	$\hat{B}_{sv}$	Estimation amortissement volant	Non Contraint
	$\hat{J}_{sv}$	Estimation inertie volant	Non Contraint
	$\gamma_{Poursuite}$	Vitesse mise à jour	A identifier
	$r_{Poursuite}$	Seuil de déclenchement	A identifier

TABLE 8.3 – Récapitulatif des entrées-sorties-paramètres du mécanisme d'adaptation du module de poursuite.

cohérentes. Pour cela, nous faisons l'hypothèse que le recrutement de nouvelles unités motrices résulte d'une décision provenant du système nerveux central à la suite de la détection notamment kinesthésique d'une quelconque perturbation du mouvement désiré. Nous savons expérimentalement que cette boucle possède un temps de réaction $T_{ReactionKine}$ de l'ordre de 110 ms (Rigal, 2002). Par ailleurs, les muscles ont une capacité limitée dans la production de forces, ainsi l'impédance apparente du conducteur au niveau du volant sera bornée. En supposant enfin un recrutement maximal d'unités motrices entre les valeurs extrêmes des paramètres d'impédance musculaire, nous proposons alors une estimation de la valeur maximale de la vitesse à laquelle l'impédance apparente peut être modifiée.

Ainsi nous notons β le vecteur regroupant les paramètres décrivant l'impédance apparente du conducteur au niveau du volant. En pratique, ce vecteur est formé d'une raideur ainsi que d'une viscosité apparente. Nous faisons l'hypothèse supplémentaire que le niveau d'impédance est minimal (respectivement maximal) lorsque chacun des éléments de β est minimal (respectivement maximal). De ce fait, la vitesse de modulation d'impédance $\gamma_{Impedance}$ maximale que nous venons de définir prend la forme décrite à l'équation 8.26.

$$\gamma_{Impedance} = \frac{1}{T_{RecationKine}}.(\beta_{Max} - \beta_{Min}) \tag{8.25}$$

Dépendance au couple de poursuite

Comme nous avons pu le constater au chapitre 2, Pick et Cole ont mis en évidence une dépendance quasi-linéaire de la raideur et de la viscosité apparente du conducteur par rapport au niveau de couple volant (Pick et Cole, 2006a). Cela provient du fait que selon le niveau de force à produire, l'état d'excitation

des unités motrices (sommation temporelle) ainsi que le nombre d'entre elles recrutées (sommation spatiale) varient et modifient ainsi les caractéristiques viscoélastiques globales des membres. De ce fait, l'impédance apparente minimale du conducteur ne saurait rester identique selon les niveaux de couple au volant auxquels le conducteur doit faire face. Rappelons que dans notre formalisme, le couple produit par le conducteur pour mettre en mouvement le volant en tenant compte de la dynamique de celui-ci résulte du niveau de contrôle dit de poursuite $\Gamma_{Poursuite}$. Ainsi nous pouvons en particulier écrire :

$$\beta = \beta(..., \Gamma_{Poursuite}, ...) \tag{8.26}$$

Dépendance au niveau d'erreur

Nous avons vu au chapitre 5 que la modulation d'impédance des membres était une solution ingénieuse dans l'exploitation des caractéristiques musculaires et ce dans le but de rejeter des phénomènes perturbateurs aussi bien lors d'un simple mouvement ou lors de la manipulation d'un objet (Bizzi et al., 1982, Cheze, 2005, McIntyre et al., 1996). En particulier, le temps que cette perturbation puisse être internalisée est alors compensée (Milner et franklin, 2005). De ce fait nous écrivons :

$$\beta = \beta(..., E_{Impedance}, ...) \tag{8.27}$$

Nous rappelons que dans l'équation 8.27, le terme $E_{Impedance}$ désigne le vecteur mesurant l'écart entre la position (et ses dérivées premières) courante du volant et celle désirée.

Modèle de modulation

Nous détaillons maintenant la manière dont l'impédance apparente du conducteur sera modulée au sein de notre modèle. Pour des raisons d'ordre énergétique, nous faisons l'hypothèse que le niveau d'impédance du conducteur est, pour un certain niveau d'erreur fixé, minimal. Nous pouvons illustrer notre propos par la figure 8.5. Nous y faisons en particulier figurer les contraintes sur le niveau d'impédance du conducteur que nous avons exposées précédemment (valeurs minimales et maximales, dépendance au couple de poursuite $\Gamma_{Poursuite}$).

Prenons l'exemple de l'augmentation inattendue du couple au niveau du volant. Le niveau d'impédance du conducteur se trouve dans l'état (1) où celui-ci est juste suffisant pour maintenir le volant dans la position désirée. Suite à une modification de couple au volant, le conducteur accroît son niveau d'impédance afin de maintenir son niveau de précision sur la position du volant : c'est l'état (2). Le conducteur contracte alors les muscles de ses bras autant que nécessaire.

Toutefois, cet état est coûteux en énergie. Nous nous plaçons alors dans le cas où le conducteur est dans la possibilité d'internaliser ce nouveau contexte de conduite. L'état (2) est alors transitoire, le temps que le couple de poursuite $\Gamma_{Poursuite}$ produit par le conducteur soit adéquat, état (3).

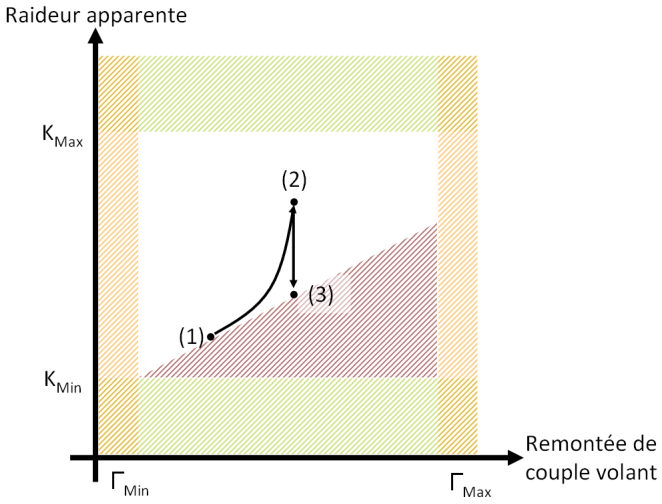


FIGURE 8.5 – Exemple de comportement de la stratégie de modulation d'impédance lors d'une élévation de couple au niveau du volant. Les différentes étapes d'évolution du niveau d'impédance sont matérialisées par les états (1), (2) et (3). Les parties hachurées en vert décrivent les zones physiologiquement impossibles à atteindre. Celles en orange représentent la gamme de couple remontée au niveau du volant et par extension, la plage de valeurs du couple de poursuite. Enfin, la zone hachurée en rouge rend compte de l'évolution de l'impédance minimale du conducteur selon le niveau de couple qu'il produit et donc le niveau d'activation de ses muscles.

La récapitulation des différentes exigences et hypothèses citées précédemment permet d'établir la liste des spécifications suivantes pour le modèle de modulation d'impédance :

- déclenchement de la modulation d'impédance par franchissement d'un seuil de niveau d'erreur $E_{Impedance}$,
- niveau d'impédance borné par les valeurs minimales et maximales de ses paramètres,
- niveau d'impédance supérieur ou égal au niveau d'impédance minimum résultant du couple produit $\Gamma_{Poursuite}$,
- augmentation de l'impédance avec le niveau d'erreur $E_{Impedance}$,
- diminution de l'impédance à niveau d'erreur $E_{Impedance}$ constant vers son niveau minimal.

Nous pouvons alors établir une stratégie à deux états. Soit le niveau d'erreur $E_{Impedance}$ est supérieur au seuil de déclenchement, l'impédance apparente du conducteur augmente de manière à réduire ce niveau d'erreur (passage des états (1) à (2) sur la figure 8.5). Soit le niveau d'erreur $E_{Impedance}$ est inférieur au seuil de déclenchement, dans ce cas l'impédance apparente du conducteur n'est pas figée mais modulée de manière décroissante pour atteindre un niveau juste suffisant (passage des états (2) à (3) sur la figure 8.5).

Concernant la dynamique de modulation d'impédance, nous nous inspirons de la technique de contrôle adaptatif par gains élevés (High Gain Adaptive Control) que nous avons vu au chapitre 6 où l'évolution temporelle des paramètres du contrôleur est indexée sur l'erreur quadratique de poursuite. Ainsi nous proposons comme modèle de modulation d'impédance :

- $\forall \|E_{Impedance}\|$, $\beta_{Min}(\Gamma_{Poursuite}) \leq \beta \leq \beta_{Max}$
- Si $\|E_{Impedance}\| \leq r_{Impedance}$ alors $\frac{d\beta}{dt} = 0$
- Si $\|E_{Impedance}\| > r_{Impedance}$ alors $\frac{d\beta}{dt} = \gamma_{Impedance}.\|E_{Impedance}\|^2$

Le vecteur de paramètres β_{Max} est constant quelque soit le contexte de conduite (i.e. le niveau de couple produit par le conducteur). Il n'en est pas de même pour le vecteur β_{Min} qui est, comme nous l'avons vu précédemment, dépendant de ce niveau de couple. Dans notre cas, $E_{Impedance} \in \Re^2$, la norme utilisée est alors définie par la matrice $Q \in \Re^{2x2}$ semi-définie positive et diagonale telle que pour tout $X \in \Re^2$, $\|X\|^2 = X^T.Q.X$.

Les différentes entrées, sorties et paramètres sont répertoriés dans le tableau 8.4.

8.5 Tests préliminaires

Nous exposons dans ce paragraphe quelques résultats de simulation. Le modèle présenté dans ce chapitre est implémenté sous MATLAB/SIMULINK. Notre objectif est de tester en particulier le fonctionnement des modules de modulation d'impédance et d'apprentissage. Nous évaluerons alors l'impact d'une modification de la raideur volant sur la performance de contrôle du volant. Le conducteur est supposé vouloir appliquer une consigne d'angle volant constante, égale à 30°. Les jeux de paramètres utilisés sont approximatifs, certains issus de la littérature, d'autres établis empiriquement pour la simulation. Certains de ces paramètres feront l'objet d'une estimation plus précise lors du chapitre suivant.

Type	Nom	Déscription	Gamme de valeurs
entrée	$\Gamma_{Poursuite}$	Couple de poursuite du conducteur	Non contraint
	θ_{Desire}	Position consigne d'angle volant	Non contraint
	$\theta_{Courant}$	Position courante d'angle volant	Butées matérielles
sortie	$K_{Impedance}$	Raideur apparente du conducteur	De 0 à 150N.m/rad
	$B_{Impedance}$	Viscosité apparente du conducteur	De 0 à 5N.m/rad/s
paramètre	$a_{Raideur}$	Dépendance au couple de poursuite	Pick et Cole, 2006a
	$b_{Raideur}$	Dépendance au couple de poursuite	Pick et Cole, 2006a
	$a_{Viscosite}$	Dépendance au couple de poursuite	Pick et Cole, 2006a
	$b_{Viscosite}$	Dépendance au couple de poursuite	Pick et Cole, 2006a
	$\gamma_{Impedance}$	Vecteur vitesse de mise à jour	A identifier
	$r_{Impedance}$	Seuil de déclenchement	A identifier

TABLE 8.4 – Récapitulatif des entrées-sorties-paramètres du mécanisme d'adaptation du module d'impédance.

Nous nous plaçons dans le cas où le conducteur décide d'appliquer un angle volant de 30°. La raideur du système volant est fixée à 3N.m/rad en condition nominale et atteint 9N.m/rad après modification. Le profil d'évolution de cette raideur est de type échelon. Le conducteur possède une représentation interne parfaite du système volant. Quatre conditions sont donc testées :

- "Statique" (C1) : les paramètres du module d'interaction sensorimotrice restent fixes,
- "Poursuite adaptative" (C2) : seul le module de poursuite est adaptatif,
- "Impédance adaptative" (C3) : seul le module d'impédance est adaptatif,
- "Double adaptation" (C4) : les modules de poursuite et d'impédance sont simultanément adaptatifs,

Pour les différents essais, les seuils de déclenchement $r_{Impedance}$ et $r_{Poursuite}$ sont fixés à zéro si bien que la plus petite variation des signaux d'erreurs respectifs suffit à mettre en œuvre les mécanismes adaptatifs. Enfin, les simulations sont réalisées au travers d'un solveur de type Euler avec un pas fixe de simulation de 1ms.

Modèle interne du système volant

La figure 8.6 représente l'évolution de la raideur du système volant (courbe bleue), celle-ci décrivant bien un profil de type échelon. Conformément au résultat attendu, la représentation interne de la raideur volant reste effectivement figée à sa valeur initiale pour les conditions C1 ou C3 (courbes verte et bleue

claire confondues, la vitesse $\gamma_{Poursuite}$ y est nulle). Nous observons pour les conditions C2 et C4 que la mise à jour est bien exécutée et converge bien vers la nouvelle valeur de raideur du système volant. Bien que dans ces deux conditions, les vitesses de mise à jour soient identiques ($\gamma_{poursuite} = 100$), les profils correspondants ne sont pas superposés. Ceci provient du fait que dans la condition C4, la modulation d'impédance est déclenchée, ce qui a pour effet de produire un couple d'impédance plus important que dans la condition C2. Le système volant reçoit alors un couple du conducteur plus élevé ce qui accentue son excitation. Enfin, nous observons que les profils des conditions C1 et C2 présentent une forme de cassure : il semble que la vitesse d'apprentissage est d'autant plus rapide que la différence entre les valeurs interne et réelle de la raideur du système volant est élevée.

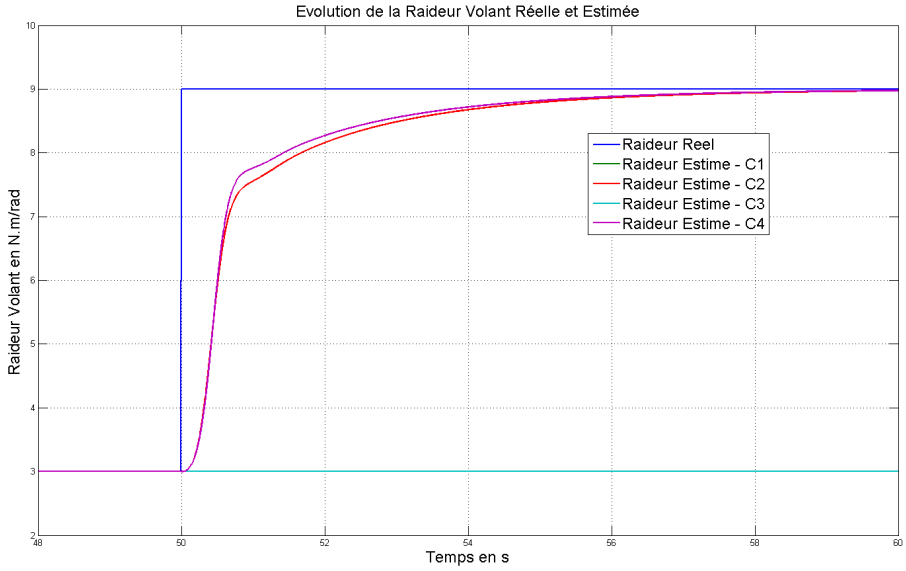


FIGURE 8.6 – Evolution de la raideur du système volant ainsi que de sa représentation interne dans le module de poursuite du modèle de conducteur. Modification du véhicule à $t = 50s$.

Modulation d'impédance

Nous présentons à la figure 8.7 l'évolution de la raideur apparente du conducteur. Les résultats sont similaires pour la viscosité apparente. Dans les conditions C1 et C2 (courbes verte et bleue confondues), le mécanisme de modulation est désactivé ($\gamma_{Impedance} = 0$) et la raideur apparente du conducteur reste donc à son niveau initial, minimum fixé dans notre exemple à 10N.m/rad. Pour les conditions C3 et C4, la modulation d'impédance est déclenchée dès que la rai-

deur du système volant est modifiée et donc dès qu'une différence existe entre la consigne d'angle volant θ_{Desire} et la valeur réelle $\theta_{Courant}$ atteinte par ce dernier. Dans la condition C3, seule la modulation d'impédance peut être employée pour faire face à la modification survenue au sein du système volant. Avec la vitesse choisie ($\gamma_{Impedance} = 900$), cette modulation peut paraître lente jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur maximale de $70N.m/rad$ (saturation physiologique). Dans le cas C4, il est intéressant d'observer que la raideur apparente converge très rapidement vers un état stable d'amplitude largement inférieure à la valeur maximale de saturation. Ce phénomène s'explique par le fait que dans cette condition, la mise à jour du module de poursuite s'avère plus rapide que la vitesse de modulation d'impédance. Comme nous l'avons vu précédemment, le profil d'apprentissage présentait une pente plus élevée en début qu'en fin d'estimation. Ainsi l'écart entre θ_{Desire} et $\theta_{Courant}$ décroit plus rapidement qu'en condition C3 si bien qu'en quelques secondes seulement la modulation d'impédance n'est plus nécessaire.

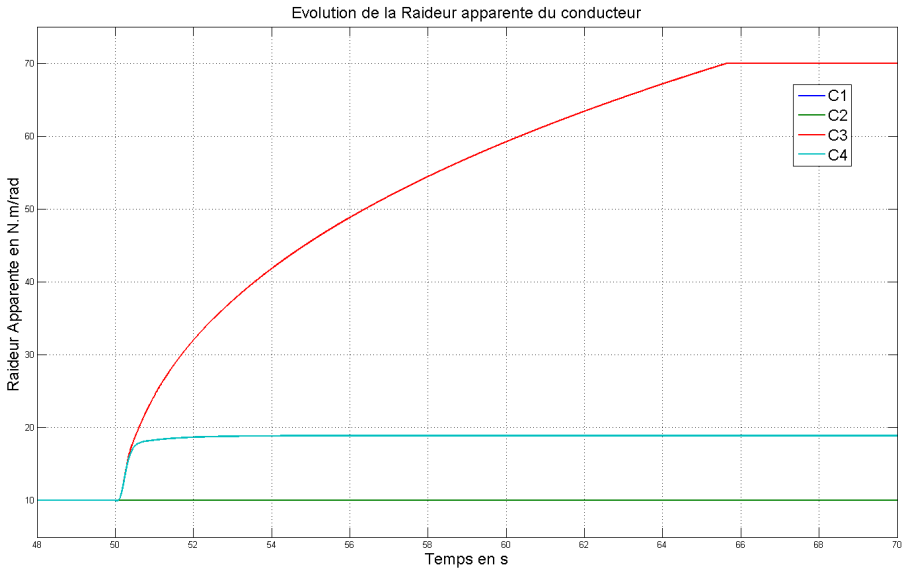


FIGURE 8.7 – Evolution de la raideur apparente du conducteur selon les conditions C1, C2, C3 et C4. Modification du véhicule à $t = 50s$.

Position du volant

Nous mettons ici en lumière les effets de la modification du système volant sur le maintien du volant à sa position de consigne désirée par le conducteur, ici 30° (voir figure 8.8). L'augmentation de la raideur du système volant a pour effet d'augmenter le couple de rappel, attirant le volant vers sa position neutre.

Dans la condition C1, la faible impédance apparente du conducteur n'est pas suffisante pour maintenir le volant dans la position désirée : la position de celui-ci diminue jusqu'à ce que le couple produit par le système volant corresponde exactement au couple de poursuite resté inchangé et au couple d'impédance. Dans la condition C2, l'apprentissage de la nouvelle valeur de raideur volant permet, au bout de quelques secondes, au module de poursuite de produire le nouveau niveau de couple adéquat pour maintenir le volant à 30°. Dans la condition C3, l'augmentation de l'impédance jusqu'à sa valeur maximale permet de réduire l'écart de position angulaire sans toutefois l'annuler. C'est une caractéristique a tout contrôleur de type Proportionnel-Dérivé où dans une réponse à un échelon subsiste un écart statique inversement proportionnel à la valeur de sa raideur. En théorie, il est donc possible de faire tendre cet écart statique vers zéro mais au prix d'une raideur infinie ce qui, comme nous l'avons déjà mentionné, n'est physiologiquement pas possible. Enfin, concernant la condition C4, nous tirons bénéfice des deux stratégies adaptatives avec pour le jeu de paramètres considéré, la convergence la plus rapide vers la position angulaire de consigne. Notons que ce résultat est obtenu pour un niveau d'impédance relativement peu élevé (voir figure 8.7).

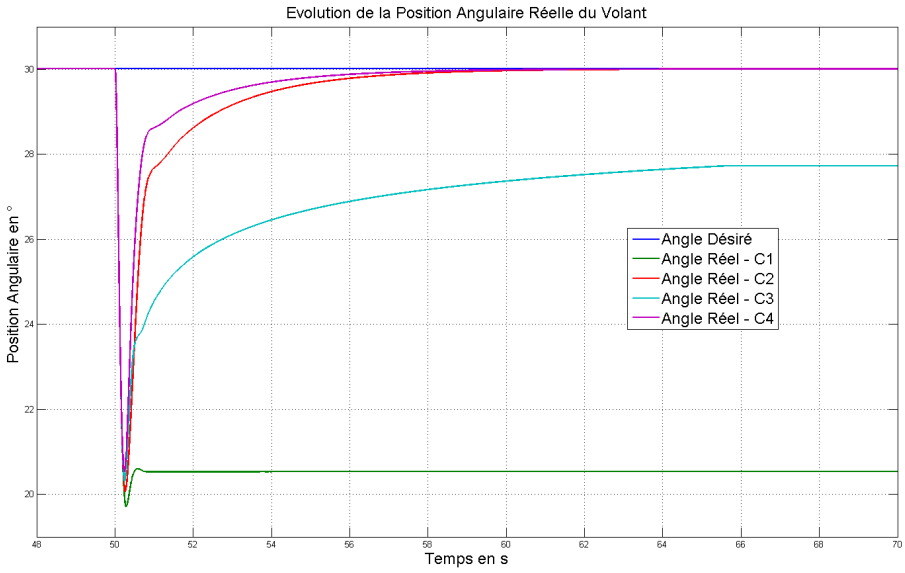


FIGURE 8.8 – Evolution de la position angulaire réelle du volant selon les conditions C1, C2, C3 et C4. Modification du véhicule à $t = 50s$.

8.6 Conclusion

Nous avons au cours de ce chapitre proposé un contexte d'étude spécifique de modification de comportement d'un véhicule ainsi qu'un modèle de conducteur présentant des capacités adaptatives pour y faire face. Malgré la simplicité de la tâche considérée (conduite en virage établi), la complexité des systèmes impliqués (au niveau du véhicule et du conducteur) nécessite d'émettre plusieurs hypothèses qui doivent faire l'objet de vérification et de validation formelles ou expérimentales. En particulier, si les techniques de contrôle adaptatif employées ont été en partie choisies pour leurs similitudes avec certaines observations expérimentales, elles n'ont pas pour objectif principal de décrire précisément la dynamique de la plasticité du système sensorimoteur. Par ailleurs, il convient de ne pas associer systématiquement notre analyse de l'adaptation des conducteurs au choix des méthodes adaptatives implémentées. De ce fait, nous proposons de distinguer les paramètres généraux caractérisant les performances des stratégies d'adaptation des paramètres propres aux techniques implémentées. Ainsi, la première catégorie peut être interprétée comme un cahier des charges auquel doit répondre la deuxième.

Les chapitres suivants ont pour objet de permettre l'estimation et la calibration de certains paramètres du modèle dont aucune connaissance n'est disponible à priori ou d'en affiner les gammes de valeurs préalablement établies. Mais notre effort porte également sur la validation du comportement du modèle par rapport à ceux observés expérimentalement. Nous souhaitons y trouver des similitudes fortes lors des phases précédent et suivant l'adaptation mais aussi lors de la mise en place, transitoire, de ces mécanismes.

Chapitre 9

Calibration

Sommaire

9.1 Introduction 130
9.2 Expérimentation 130
9.2.1 Matériels et méthodes 130
9.3 Résultats et discussion 133
9.3.1 Modèle de la dynamique latérale du véhicule . . . 134
9.3.2 Modèle du système volant 135
9.3.3 Impédance apparente 136
9.3.4 Performance de conduite 139
9.4 Conclusion 146

9.1 Introduction

Nous avons au cours du chapitre 8 proposé une modélisation du comportement du conducteur lorsque celui-ci subit une modification de la dynamique de son véhicule lors d'une conduite en virage établi. Malgré la simplicité apparente de cette tâche, un nombre élevé d'hypothèses ont été posées afin de réduire la complexité du système global concerné (mécanique et humain). Par ailleurs, si un grand nombre de paramètres interviennent dans la formulation du modèle, une part importante peut être obtenue au travers de la lecture de la littérature. Les paramètres résiduels doivent alors êtres estimés, ce qui est l'objet de ce chapitre. Nous y présenterons une expérimentation réalisée dans l'objectif d'en déterminer des gammes de valeurs, en accord avec la population de sujets y ayant participé. Par ailleurs, afin de disposer d'un modèle de l'ensemble conducteur et véhicule pour en étudier l'interaction, nous proposerons une modélisation de la dynamique du système volant et du comportement latéral du véhicule utilisés sur les simulateurs de RENAULT.

9.2 Expérimentation

9.2.1 Matériels et méthodes

Neuf sujets masculins ont participé à cette expérimentation. La moyenne d'âge de cet échantillon était de 28.8 ans. Tous les sujets étaient détenteurs du permis B depuis plus de deux ans et coutumiers des environnements de réalité virtuelle. La tâche qui leur fut proposée consistait en une conduite à 70km/h en virage établi de rayon de courbure constant égal à 100m. L'environnement virtuel était principalement composé d'une surface plane de goudron sur laquelle des marquages au sol permettaient aux conducteurs de suivre des trajectoires circulaires de différents rayons (voire figure 9.1). Au point de fonctionnement considéré, le conducteur doit maintenir le volant à la position de 30° et le système volant restitue un couple de l'ordre 3N.m. La logique implémentée au niveau du système volant est telle qu'à vitesse stabilisée, le volant se comporte comme un système masse-amortisseur-ressort.

Afin de stimuler le conducteur pour identifier dans sa réponse certains paramètres de notre modèle, nous modifions le couple restitué par le conducteur en l'affectant d'un gain que nous pilotons. Un gain unitaire revient à ne pas modifier le couple issu du système volant. Nous choisissons un gain de deux afin que ce niveau génère une variation maximale dans la gamme de valeurs accessibles pour le couple généré. En effet, le restituteur de couple était dans une configuration où pour raisons de sécurité, les butées logicielles de la consigne

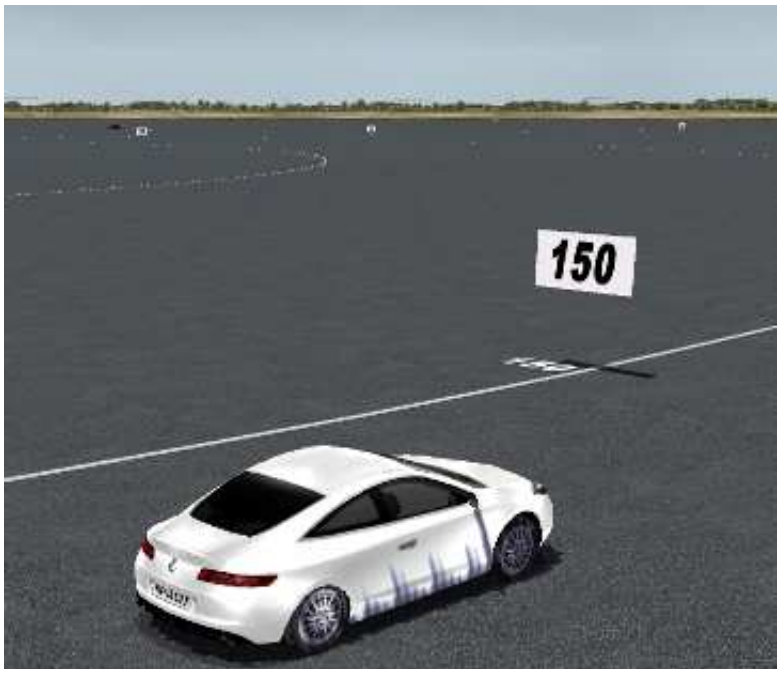


FIGURE 9.1 – L'environnement virtuel était composé d'une surface plane dotée de marquages au sol formant des cercles concentriques de différents rayons, ici l'anneau de 150m utilisé au cours de l'expérimentation.

de couple étaient fixées à $8N.m$ en valeur absolue. Des tests préliminaires ont alors permis de vérifier que la consigne de couple à appliquer restait, même après modification, dans une gamme de valeurs comprises entre $\pm 8N.m$. Dans un cas, le gain affecté au couple produit par le système volant passe de 1 à 2 (nous parlerons alors de montée de couple), dans l'autre cas, le gain initialement à 2 commute sur la valeur 1 (descente de couple).

Différentes conditions sont alors testées pour permettre d'identifier et/ou de valider la cohérence de la réponse du modèle avec l'allure des réponses des conducteurs participants. La première condition concerne le type de sollicitation. Celle-ci est liée à l'état de contraction musculaire des sujets. Nous identifions ainsi la condition souple où il est demandé au sujet de maintenir le volant avec un niveau d'impédance minimal. A l'opposé, en condition raide, le sujet reçoit l'instruction de maintenir avec le niveau d'effort maximum le volant dans la position désirée. Nous souhaitons ainsi obtenir leur niveau d'impédance maximal. En seconde condition, il est demandé au sujet soit de corriger sa trajectoire à la suite de la modification du couple produit par le système volant (condition active) soit de ne pas corriger les effets de celle-ci (n'opposer aucune

Condition 1	Condition 2	Sollicitation
Passif	Souple	Montée de couple x5
		Descente de couple x5
	Raide	Montée de couple x5
		Descente de couple x5
Actif	Souple	Montée de couple x5
		Descente de couple x5
	Raide	Montée de couple x5
		Descente de couple x5

TABLE 9.1 – Récapitulatif des différentes conditions testées.

résistance) et de conserver leur niveau d'effort produit avant l'occurrence de la modification (condition passive). Le tableau 9.1 récapitule les enchaînements des différentes conditions énoncées précédemment.

Avant chaque nouvelle variation du couple produit par le système volant, le sujet se replace sur l'anneau de $100m$ de rayon et stabilise sa vitesse. Le déclenchement de la modification a lieu quelques secondes après que le sujet est stabilisé, en particulier au niveau de la position angulaire du volant. Les sujets ne sont pas informés de l'occurrence de l'évènement sauf dans la condition passive. En effet, dans cette condition, nous demandons aux sujets de fermer les yeux avant la modification du couple afin qu'ils ne soient pas tentés de corriger de manière instinctive et au travers des informations visuelles leurs positions à la fois sur la voie et du volant (voir figure 9.2). Pour chacune des quatre combinaisons de conditions possibles actif/passif et souple/raide, les sujets font l'expérience de cinq montées et cinq descentes de couple.

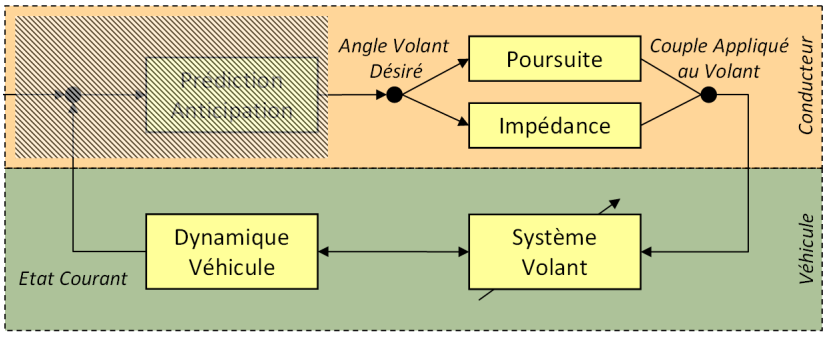


FIGURE 9.2 – En condition passive, seul le module d'interaction sensorimotrice est stimulé.

9.3 Résultats et discussion

Afin de pouvoir confronter le comportement du modèle de conducteur adaptatif avec les résultats expérimentaux, nous devons être dans la capacité de pouvoir tester avec le modèle les essais proposés aux sujets. Pour ce faire, nous devons disposer à la fois d'un modèle du système volant et de la dynamique latérale du véhicule. Plusieurs solutions se présentent. La première d'entre elles serait de recourir directement aux modèles utilisés dans le simulateur de conduite CARDS2 (voire figure 9.3). Toutefois, la complexité et la précision de ces derniers peuvent paraître disproportionnées par rapport à nos besoins. Une seconde solution est de recourir à des modèles plus simples. Un grand nombre de modèles de dynamique latérale du véhicule ont été proposés comme le populaire modèle bicyclette. Cette solution nécessiterait, après établissement du modèle, une phase de calibration de ses paramètres. Nous rappelons que notre objectif n'est pas de développer un modèle de véhicule et de système volant. Par ailleurs, nous réalisons nos essais à des points de fonctionnement précis où le recours à la linéarisation des comportements des systèmes impliqués est courant. Ainsi, nous proposons de décrire ces systèmes par des modèles paramétriques linéaires et de recourir à la théorie de l'identification des systèmes linéaires.



FIGURE 9.3 – Simulateur de conduite CARDS2 - RENAULT, Centre Technique de Simulation.

9.3.1 Modèle de la dynamique latérale du véhicule

Afin de pouvoir identifier la dynamique latérale du véhicule utilisé au sein du simulateur, nous avons réalisé une conduite à vitesse constante, $70km/h$, en faisant varier l'angle volant entre approximativement -45 et $+45$ degrés avec une vitesse angulaire variant entre -10 et $+10$ degrés/s (voir figure 9.4). La fonction de transfert dont nous désirons estimer les paramètres décrit l'évolution de l'accélération latérale du véhicule en fonction de l'angle volant θ qui lui est appliqué. Celle-ci nous permet alors par double intégration d'obtenir les variations de la position latérale y du véhicule.

Les grandeurs mesurées furent la position angulaire du volant, les positions, vitesses et accélérations du véhicule (en coordonnées cartésiennes). Ces données furent enregistrées à 20Hz et réalisées sur le simulateur dynamique CARDS2. Nous choisissons d'approximer la dynamique latérale du véhicule par un modèle

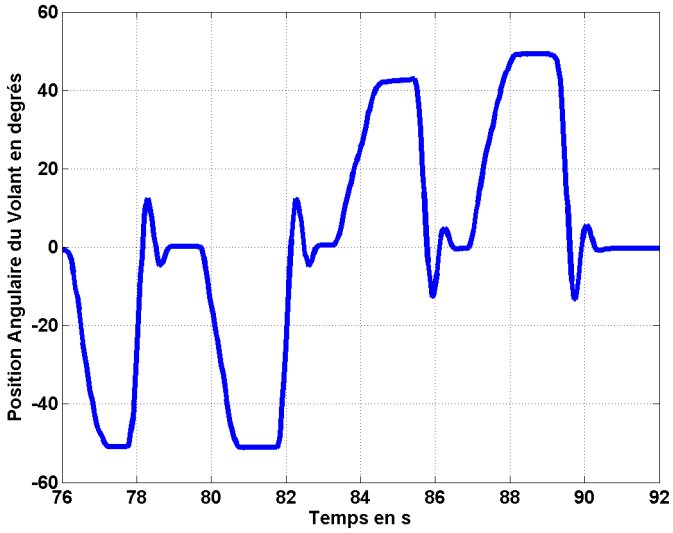


FIGURE 9.4 – Profil de la position angulaire du volant pour l'identification de la dynamique latérale du véhicule (accélération latérale).

linéaire paramétrique du second ordre (voir équation 9.1). Parmi plusieurs types de modèles paramétriques testés, le modèle de type ARMAX présentait la plus faible erreur de prédiction de l'accélération latérale du véhicule (RMS entre accélération mesurée et prédite par le modèle de 96.73%).

$$\frac{Y(s)}{\Theta(s)} = \frac{1}{s^2} \cdot \frac{a_0}{s^2 + b_1.s + b_2} \tag{9.1}$$

Les paramètres du modèle paramétrique identifié sont présentés au tableau 9.2. L'estimation est réalisée par la routine $armax()$ de Matlab. Cette fonction

minimise l'erreur de prédiction d'un modèle paramétrique par une descente de gradient.

Paramètre	Valeur	Unité
a_0	-9.89	$m.deg^{-1}.s^{-4}$
b_1	11.72	s^{-1}
b_2	84.66	s^{-2}

TABLE 9.2 – Estimation des paramètres de la dynamique latérale du véhicule.

9.3.2 Modèle du système volant

Comme pour la calibration du modèle de dynamique véhicule, nous réalisons une session de mesures pour l'identification des paramètres du système volant. Ce dernier est modélisé par un système du second ordre et englobe, au point de fonctionnement étudié (vitesse d'évolution du véhicule de $70km/h$), à la fois le comportement mécanique du volant, la remontée d'effort au niveau de la colonne de direction et enfin la stratégie d'assistance implantée au niveau de la direction assistée. Plusieurs lâchers de volant ont été réalisés à partir de deux positions angulaires : ± 37 degrés.

Les grandeurs mesurées furent la position angulaire du volant (voir figure 9.5), le couple envoyé au restituteur ainsi que le couple mesuré par le capteur de couple. Ces enregistrements, à 20 Hz, ont été réalisés sur le simulateur dynamique CARDS2. L'estimation des paramètres (voir tableau 9.3) est réalisée par la routine $oe()$ de Matlab. Cette fonction minimise l'erreur de prédiction d'un modèle paramétrique par une descente de gradient. Parmi les différents types de modèles paramétriques disponibles, notre choix s'est porté sur un modèle de type erreur de sortie car ce dernier offrait les meilleurs performances en termes de fit (94%). La valeur relativement faible pour l'inertie apparente

Paramètre	Valeur	Unité
Inertie apparente	0.0528	kg.m^2
Ammortissement apparente	0.3809	N.m.s/rad
Raideur apparente	3.6895	N.m/rad

TABLE 9.3 – Estimation des paramètres du modèle du système volant.

du volant n'est pas à confondre avec celle de l'inerte mécanique du volant (généralement de 2 à 5 fois plus élevée). Cette valeur s'explique en partie par

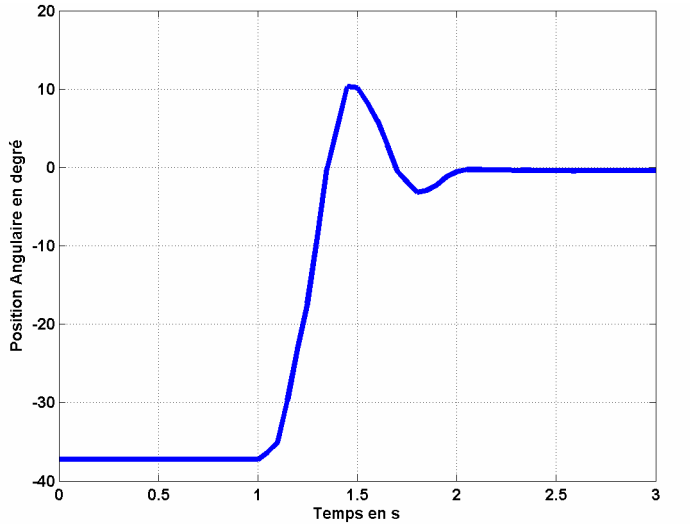


FIGURE 9.5 – Profil de la position angulaire du volant suite au lâcher de volant. Le lâcher a lieu après 1s de régime stabilisé. Ces données sont utilisées pour identifier à un point de fonctionnement spécifié, les caractéristiques du système volant : raideur, amortissement et inertie apparentes.

le fait que la stratégie de commande du restituteur inclut une compensation de cette inertie mécanique.

9.3.3 Impédance apparente

Les différents essais réalisés en condition passive (pas de rétrocontrôle sur la position du volant par les sujets) ont permis d'établir pour chacun des sujets des jeux de paramètres caractérisant leur impédance apparente (raideur, viscosité et inertie) et ce pour les deux conditions extrêmes étudiées : en maintien souple et raide du volant. La manière d'établir ces résultats est identique à celle employée pour l'identification des paramètres du modèle de dynamique véhicule et de restitution de couple volant (décrite précédemment). Notre objectif ici est de ne s'assurer de la cohérence des résultats obtenus par notre approche (que ce soit au niveau du modèle mais aussi de l'expérimentation) avec les observations décrites dans Pick et Cole, 2003 et Pick et Cole, 2006a. Nos mesures inter-sujets sont regroupées dans le tableau 9.4 où figurent également les résultats de Pick et Cole précédemment cités. Par ailleurs, dans le but d'évaluer l'impact de la condition souple/raide sur les paramètres identifiés, nous aurons recours au test de Wilcoxon. Pendant du test de Student pour des distributions gaussiennes, ce test statistique non paramétrique est particulièrement adapté à des échantillons de population de nature inconnue en nombre restreint (typiquement inférieur à 30). Nous utilisons pour réaliser ce test la

Condition	Raideur, $N.m.rad^{-1}$	Viscosité, $N.m.s.rad^{-1}$	Inertie, $kg.m^2$
Souple	11.394 ± 9.220 (2.92 ± 1.19)	2.957 ± 1.797 (0.61 ± 0.21)	0.268 ± 0.0744 (0.11 ± 0.018)
Raide	45.677 ± 26.772 (56.42 ± 24.67)	3.427 ± 1.517 (1.17 ± 0.35)	0.279 ± 0.0883 (0.11 ± 0.018)

TABLE 9.4 – Résultats des mesures des caractéristiques viscoélastiques apparentes des sujets et comparaison, termes entres parenthèses, avec ceux de Pick et Cole, 2003 et Pick et Cole, 2006a.

routine *signrank*() intégrée à MATLAB. Pour cette étude, neuf sujets ont participé à l'expérimentation.

Globalement, nous observons une importante variabilité inter-sujet au niveau des trois paramètres identifiés. Ces différences sont d'autant plus conséquentes pour la raideur apparente des sujets : nous mesurons des écarts de valeurs de un à dix entre les conditions souple et raide. De même, le niveau de raideur apparente d'un des sujets en condition raide est du même ordre de grandeur que celui d'un autre sujet en condition souple. Ce niveau de raideur apparente en condition souple relativement élevé pour certains sujets peut s'expliquer par une interprétation erronée de la tâche qui leur était demandée. Le recours à des enregistrements électromyographiques autoriserait le contrôle de l'état de contraction musculaire des différents sujets tout au long de l'expérimentation et permettant ainsi au sujet un meilleur apprentissage des conditions souple et raide. Mais l'anticipation, même inconsciente, par les sujets des variations de couple au niveau du volant peut aussi être l'un des facteurs à l'origine d'une contraction musculaire anormalement élevée au regard de la condition de test.

Nous constatons des niveaux d'inertie et de viscosité apparentes supérieurs à ceux issus des travaux de Pick et Cole. Nous n'observons pas d'influence de la condition souple/raide sur l'inertie apparente ($P_{0.01} = 0.42578$), ce qui est compatible avec les résultats issus de la littérature. Nous ne trouvons pas non plus d'influence de la condition sur la viscosité apparente ($P_{0.01} = 0.30078$), ce qui cette fois semble être en contradiction avec cette même littérature. Ceci peut s'expliquer par un possible accompagnement involontaire du volant par les sujets lors de la montée et de la descente de couple, augmentant alors la viscosité globale de l'ensemble "conducteur - système volant". Enfin, concernant la raideur apparente des sujets, les mesures établies correspondent aux gammes proposées par Pick et Cole (9.4). De plus, la condition souple/raide

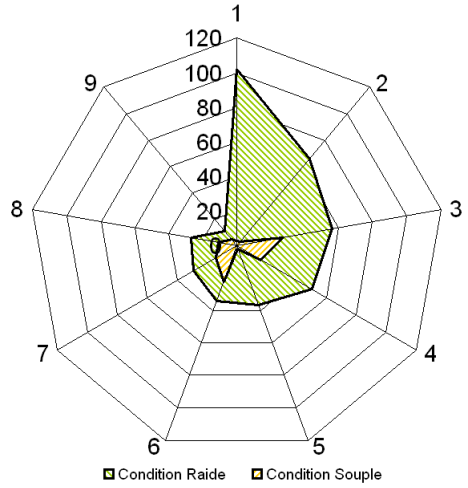


FIGURE 9.6 – Evolution de la raideur apparente des sujets selon les conditions raide et souple. Chaque branche du graphique représente un sujet. La variabilité en condition raide révèle d'autant plus les différences morphologiques entre les sujets. Les sujets ont été classés par ordre de raideur apparente en condition raide décroissante.

a un effet significatif sur les valeurs de raideur apparente ($P_{0.01} = 0.0039063$). L'augmentation systématique de la raideur apparente en condition raide est illustrée figure 9.6.

Rappelons que la raideur et la viscosité apparentes sont, d'après les résultats de Pick et Cole, dépendantes du niveau de couple présent au volant (Pick et Cole, 2006a). Plus ce couple d'$offset$ sera élevé, plus le conducteur devra produire un couple (et donc son niveau de contraction musculaire) important. Ces derniers ont, pour rappel, établi qu'en condition souple, la raideur K et la viscosité B musculaires apparentes des conducteurs dépendaient linéairement du couple d'$offset$ C_{Offset} au volant :

$$K = 6 - 2.9.C_{Offset}, B = 0.53 - 0.086.C_{Offset}, C_{Offset} < 0 \tag{9.2}$$

$$K = 4.9 + 2.9.C_{Offset}, B = 0.61 - 0.036.C_{Offset}, C_{Offset} > 0 \tag{9.3}$$

Ainsi, nous trouvons pour un niveau de couple volant de l'ordre de -3N.m (valeur approximative du retour d'effort lorsque le véhicule évolue sur le cercle de 150m de rayon à 70km/h) une raideur et viscosité apparentes "corrigées" de respectivement 14.7N.m/rad et 0.78N.m/s/rad. Nous obtenons un ordre de grandeur de la raideur apparente plus en conformité avec nos mesures expérimentales mais cette correction s'avère insuffisante pour expliquer nos valeurs élevées de viscosité apparente.

9.3.4 Performance de conduite

Nous étudions ici les mesures obtenues lors de la conduite en condition "active". Nous rappelons que dans cette condition, il est demandé aux sujets de maintenir leur niveau de contraction musculaire la plus constante possible malgré les variations de couple au niveau de volant. Au regard de la gamme de valeurs de couple volant dans laquelle s'effectue la conduite, il est illusoire que le niveau de contraction musculaire puisse rester le même tout au long de l'expérimentation (Pick et Cole, 2006a). Toutefois, dans ce contexte de conduite, notre objectif vise à minimiser l'effet de l'impédance apparente des sujets et à mettre ainsi en évidence la dynamique de la boucle de poursuite et de ses mécanismes de mise à jour.

La figure 9.7 présente une réponse typique d'un des sujets à une perte soudaine

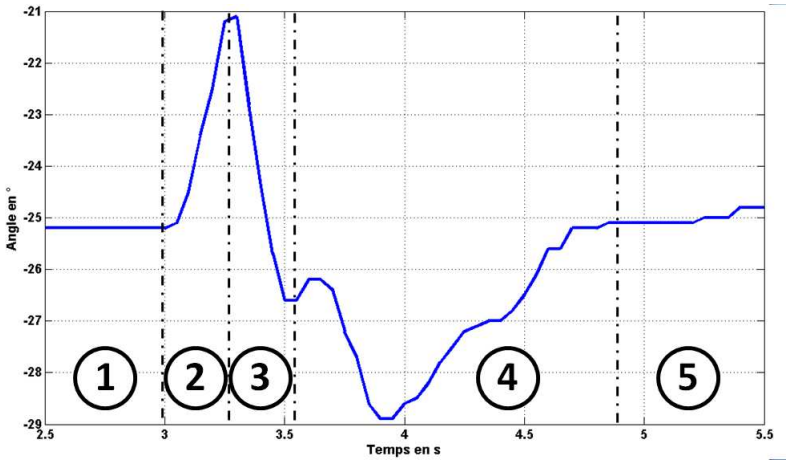


FIGURE 9.7 – Variation de l'angle volant suite à une coupure soudaine d'assistance de couple en condition active.

d'assistance de couple volant. Nous y identifions les étapes suivantes :

1. La trajectoire du véhicule est stabilisée sur le suivi du cercle de 150m de rayon. La conducteur maintien alors le volant dans une position adéquate. Lors d'une conduite en conditions nominales, cet angle évolue au cours du temps, corrigeant les erreurs de suivi engendrées en particulier par ses bruits perceptifs et moteurs mais aussi par le glissement des pneumatiques du véhicule sur la chaussée.
2. La variation soudaine de couple augmente où diminue le couple de rappel exercé au niveau du volant et rompt alors l'équilibre dynamique de ce dernier, le déplaçant vers une nouvelle position angulaire d'équilibre.
3. L'impédance apparente du conducteur agit contre cette perturbation et a pour effet de ramener le volant vers la position d'équilibre précédente

sans y remédier parfaitement.

4. Le conducteur corrige le niveau de couple qu'il fourni afin de retrouver la position angulaire précédente correspondant à la trajectoire désirée de son véhicule.
5. Le conducteur retrouve un état stable dans le nouveau contexte de conduite qui lui est proposé et poursuit son suivi du cercle de rayon de 150m.

Afin de caractériser la performance de conduite des sujets en fonction des différentes conditions (souple/raide), nous identifions les paramètres d'analyse suivants :

- Pic d'angle volant. Nous mesurons la variation relative d'angle volant entre son état stabilisé avant la perte d'assistance et le maximum atteint à la césure entre les étapes 1 et 2 (Voir figure 9.7).
- Instant du pic. Nous relevons à quel instant le pic d'angle volant défini ci-dessus est atteint.
- Durée de correction. Nous estimons le temps au bout duquel le conducteur atteint l'étape 5, c'est-à-dire la durée écoulée depuis la variation de couple volant jusqu'à la stabilisation la position angulaire de son volant(et donc de la trajectoire de son véhicule).

Le contrôle du véhicule présente certaines irrégularités dues à la présence de bruits sensoriels et moteurs, d'imprécisions dans le calcul des consignes à réaliser mais aussi de frottements au niveau du contact roue/sol et de jeux au sein des différents organes mécaniques. Cette variabilité naturelle, propre en partie à chaque conducteur, rend illusoire dans notre contexte un contrôle parfait du volant et de l'écart sur la voie du véhicule. Afin d'illustrer ceci, nous avons réalisé pour un sujet une conduite où la tâche consistait au suivi de trajectoires circulaires de différents rayons. Pour cela, nous avons repris le contexte de conduite défini au chapitre 9. Les figures 9.8 et 9.9 représentent respectivement les distributions des variations relatives de la position angulaire du volant et de l'écart du véhicule à la trajectoire de consigne.

Ce phénomène peut rendre délicate l'interprétation des prédictions du modèle en particulier concernant le critère de durée de correction. Nous pouvons alors définir un seuil de précision en deça duquel toute fluctuation ne sera pas mesurable ou du moins imputable aux mécanismes adaptatifs.

Pic d'angle volant Le tableau 9.5 récapitule les valeurs moyennes $\pm$ l'écart-type de la variation maximale de l'angle volant suite à la perte et au retour d'assistance.

Si la condition souple/raide a une influence significative sur la valeur du pic d'angle volant ($P_{0.05} = 0.0039063$), il n'en est pas de même pour la descente de couple où les variations ne sont pas significatives ($P_{0.05} = 0.12891$). Cette

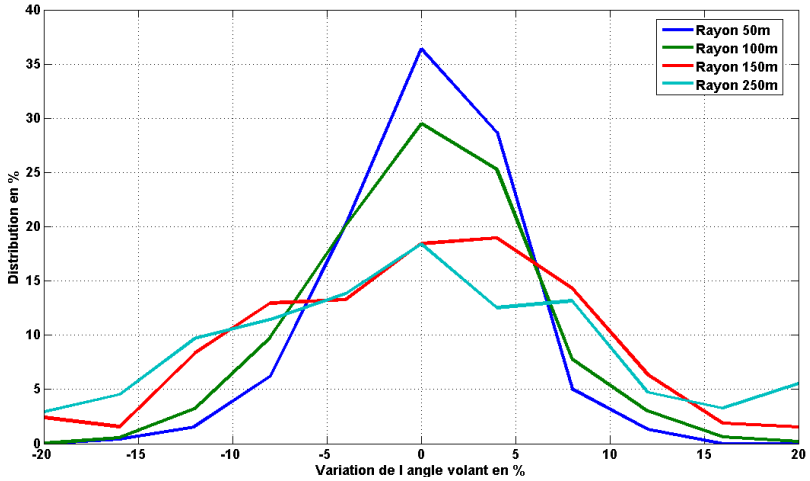


FIGURE 9.8 – Distribution de la variation relative de l'angle volant lors de conduites à la vitesse de $70km/h$ autour de cercles de 50, 100, 150 et $250m$ de rayons.

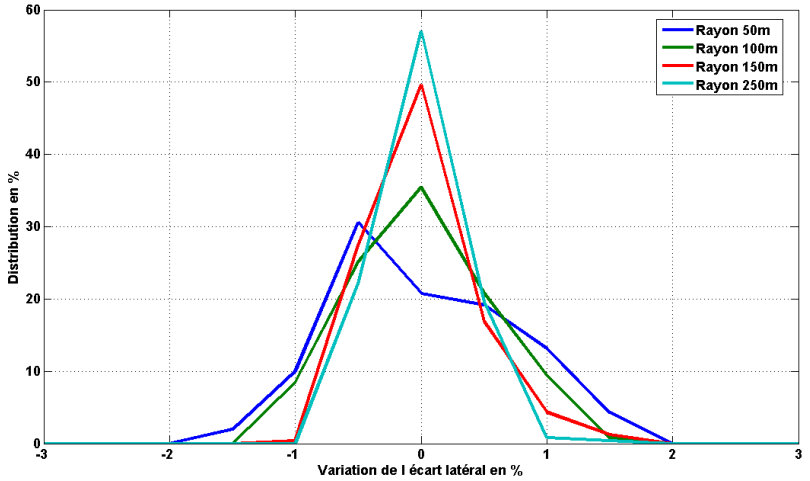


FIGURE 9.9 – Distribution de la variation relative de l'écart latéral du véhicule lors de conduites à la vitesse de $70km/h$ autour de cercles de 50, 100, 150 et $250m$ de rayons.

différence lors de la descente de couple peut s'expliquer par le fait que le niveau de contraction musculaire des sujets est plus élevé que lors de la montée de couple car le niveau d'effort au volant est plus important. La figure 9.10 présente les variations de ce pic d'angle volant pour chaque sujet lors d'une montée de couple.

Condition	Couple	Pic d'angle en %
Souple	Montée	-25.36 ± 8.86
	Descente	27.77 ± 10.16
Raide	Montée	-14.46 ± 2.87
	Descente	20.064 ± 7.31

TABLE 9.5 – Performances de conduite des sujets pour le critère de pic d'angle volant, selon la condition souple/raide et l'événement montée/descente de couple.

La simulation à impédance apparente constante de la réponse des sujets a été conduite pour des gammes de valeurs de raideur et de viscosité cohérentes avec les plages obtenues lors des essais en condition passive (voir figure 9.11). Les amplitudes du pic d'angle volant ainsi obtenues sont du même ordre de grandeur que celles mesurées expérimentalement. Nous y observons en particulier une tendance à la décroissance de ce pic au fil de l'augmentation des paramètres de raideur et de viscosité apparentes. Toutefois, il nous est difficile d'établir si pour une même amplitude du pic d'angle volant entre mesure expérimentale et simulation, correspondent un même niveau d'impédance apparente. Pour ce faire, il serait en particulier intéressant de disposer de mesures de type EMG afin de quantifier l'état de contraction musculaire des sujets lors des différents essais.

Instant du pic Sont reportées au sein du tableau 9.6 les valeurs moyennes de l'instant du pic d'angle volant. Nous observons la même influence de la condition souple/raide sur l'instant du pic d'angle volant selon que l'évènement soit une montée ou une descente de couple. L'instant du pic est lié à l'amplitude de celui-ci puisque dépendant des caractéristiques de l'impédance apparente des sujets. Nous observons la même tendance intra-sujet qu'obtenue précédement (voir figure 9.12).

Tout comme pour la mesure de pic d'angle volant, l'instant du pic dépend en particulier des niveaux de raideur et de viscosité apparentes des sujets. Là aussi, nous retrouvons les mêmes ordres de grandeur entre simulation et mesure expérimentale avec ici également une incertitude sur les niveaux d'impédance apparentes correspondants. Les simulations montrent également que le pic d'angle volant est atteint plus rapidement en condition de haute impédance (voir figure 9.13).

Durée de la correction Les différentes valeurs de durée de correction sont reportées dans le tableau 9.7. Que ce soit lors de la montée ou de la descente de

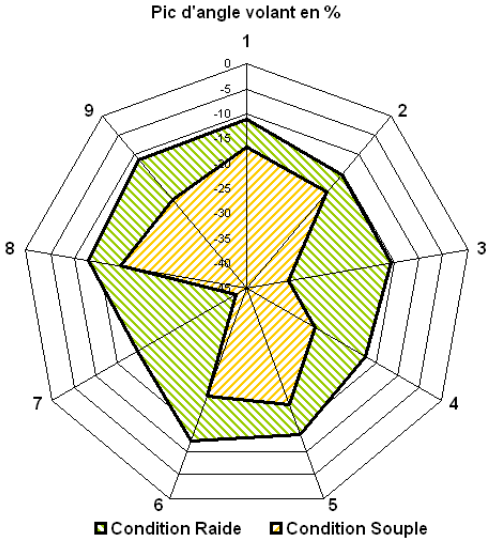


FIGURE 9.10 – Evolution de la variation maximale de l'angle volant (pic d'angle volant) suite à une montée de couple soudaine. Chaque branche du graphique représente un sujet. La condition raide (zone verte) engendre une augmentation systématique en valeur absolue de la valeur du pic d'angle volant.

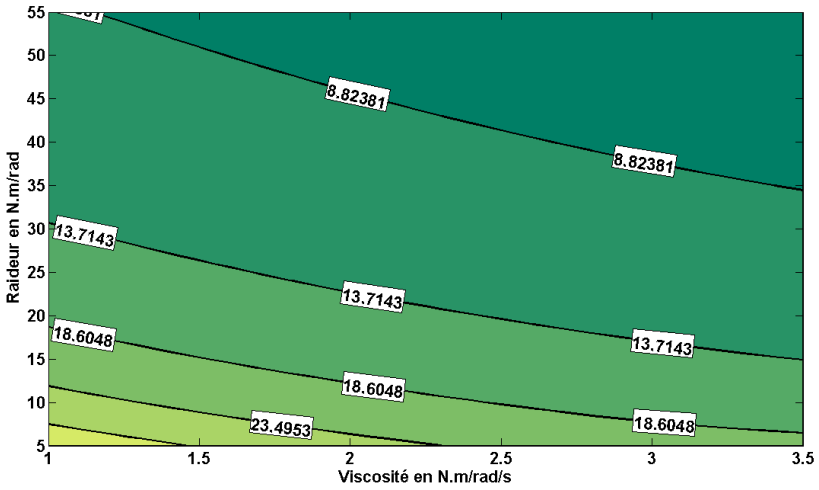


FIGURE 9.11 – Simulation : évolution de la valeur du pic d'angle volant en % pour différents couples de valeurs de la raideur et de la viscosité apparentes du conducteur.

couple, il s'avère que les durées de correction selon les conditions souple et raide diffèrent de manière significative. Ainsi lors de la montée, nous avons $P_{0.05} = 0.027344$ et $P_{0.05} = 0.0078125$ pour la descente de couple (voir figure 9.14). Ce

Condition	Couple	Instant du pic d'angle en s
Souple	Montée	0.35 ± 0.066
	Descente	0.33 ± 0.068
Raide	Montée	0.23 ± 0.031
	Descente	0.28 ± 0.046

TABLE 9.6 – Performances de conduite des sujets pour le critère de pic d'angle volant, selon la condition souple/raide et l'événement montée/descente de couple.

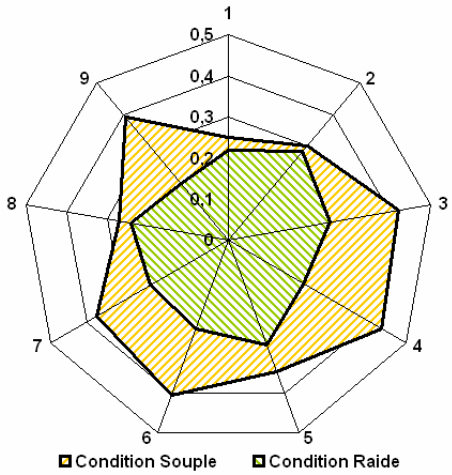


FIGURE 9.12 – Evolution de la variation maximale de l'instant du pic d'angle volant suite à une montée de couple soudaine. Chaque branche du graphique représente un sujet.

dernier critère permet de nous fournir une information importante quant à la capacité du modèle à retrouver rapidement (de l'ordre de la seconde) un état stable au niveau du volant suite à une perturbation de couple de type échelon. Le mécanisme de mise à jour du modèle interne de la boucle de poursuite voit sa vitesse dépendre principalement du paramètre $\mu_{Poursuite}$ et de la raideur apparente du conducteur (voir figure 9.15). Toutefois, la calibration d'un tel paramètre s'avère une tâche ardue de par les différentes boucles de contrôle impliquées. Notre approche consiste alors de supposer les impacts du mécanisme de modulation d'impédance (inévitable ou du moins non contrôlable dans notre expérimentation) et de la boucle de rétroaction visuelle constantes lors des conduites avec variation du couple volant. De ce fait, nous calculons à l'aide du modèle la durée de correction de la position angulaire du volant et ce pour une large gamme de valeurs du paramètre $\mu_{Poursuite}$. Si nous trouvons qu'une valeur

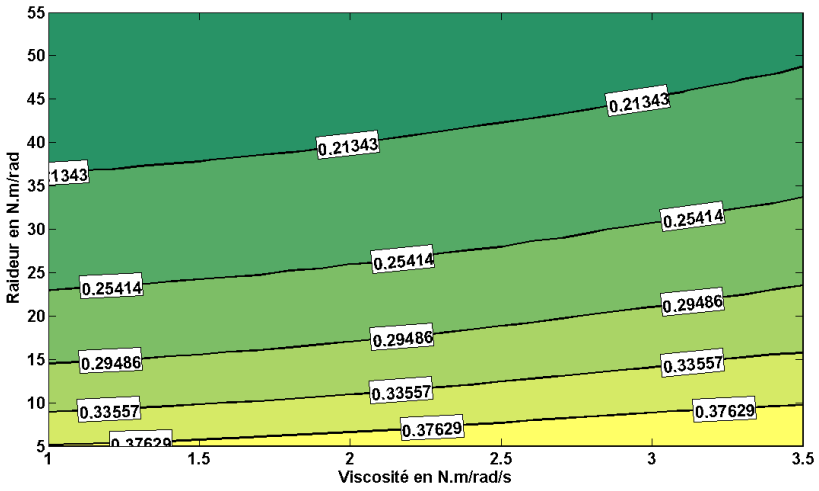


FIGURE 9.13 – Simulation : évolution de l'instant d'occurrence du pic d'angle volant en s pour différents couples de valeurs de la raideur et de la viscosité apparentes du conducteur.

Condition	Couple	Durée de la correction en s
Souple	Montée	2.29 ± 0.49
	Descente	2.09 ± 0.20
Raide	Montée	1.54 ± 0.46
	Descente	1.59 ± 0.34

TABLE 9.7 – Critère de durée de correction des sujets selon la condition souple/raide et l'événement montée/descente de couple.

numérique de l'ordre de l'unité pour la vitesse de mise à jour du modèle interne permet d'obtenir une correction globale observée expérimentalement d'environ $2s$ (et ce pour les gammes de raideur et viscosité apparentes mesurées).

Enfin, nous notons une oscillation importante de la trajectoire des sujets autour du cercle de 150m de rayon. En particulier, il apparaît que suite à une perturbation de couple, les sujets se stabilisent à une distance du marquage différente de celle qu'ils avaient adopté avant l'occurrence de l'évènement volant. Il apparaît difficile aux sujets de réguler leur trajectoire dans un tel contexte où peu d'indices visuels sont disponibles. Il est en particulier envisageable que sur un terrain plus écologique à la conduite, telle une route à une voie, la durée de correction diffère des mesures ici relevées.

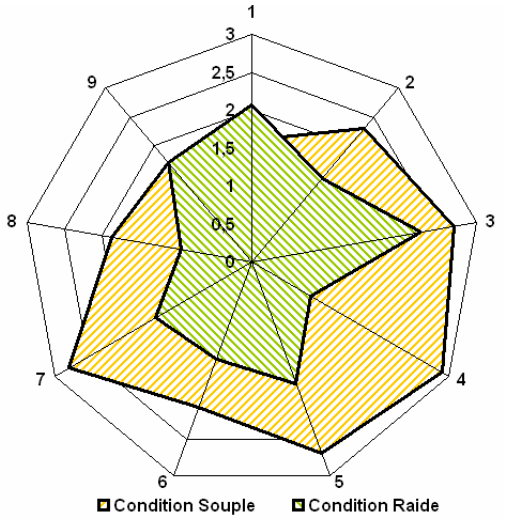


FIGURE 9.14 – Evolution du critère durée de correction suite à une montée de couple soudaine. Chaque branche du graphique représente un sujet.

9.4 Conclusion

Nous avons au cours de ce bref chapitre identifié les paramètres de modèles simplifiés du comportement latéral du véhicule ainsi que de celui du système volant. Ces modèles ne présentent un intérêt et une pertinences que parce que leur domaine de validité est restreint au point de fonctionnement étudié. Toutefois, notre approche présente l'avantage de permettre de disposer rapidement, au prix de quelques simulations, de modèles simples et légers en calculs. Par ailleurs, une partie des paramètres du modèle de conducteur proposé au chapitre 8 ont été identifiés au cours d'une expérimentation spécifique et confrontés avec succès à d'autres résultats issus quant à eux de la littérature. Les raisons pour lesquelles les autres paramètres n'ont pas été identifiés sont diverses : difficulté d'isoler, de stimuler et de mesurer spécifiquement ces paramètres ou du moins les processus qui en dépendent. La question qui est alors en suspens concerne l'intérêt d'un tel modèle pour des études de comportement de conducteurs soumis à modification de la dynamique de leur véhicule.

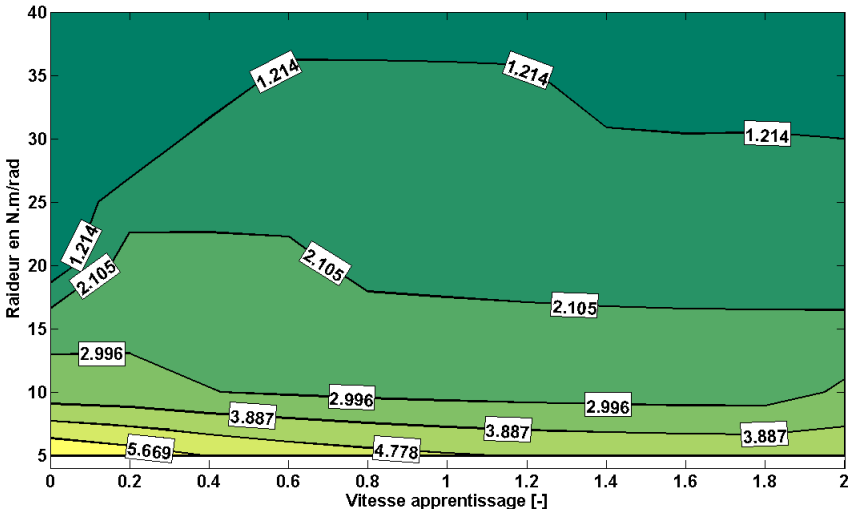


FIGURE 9.15 – Simulation : évolution du critère de durée de correction (pour un seuil de 5%) suite à une montée de couple soudaine en fonction de la raideur musculaire apparente et de la vitesse d'apprentissage. Les ordres de grandeurs obtenus sont cohérents avec les relevés expérimentaux.

Chapitre 10

Expérimentations

Sommaire

10.1 Introduction 150
10.2 Contexte simplifié 150
10.2.1 Matériels et méthodes 150
10.2.2 Résultats et discussion 154
10.3 Contexte automobile 159
10.3.1 Matériels et méthodes 160
10.3.2 Résultats et discussion 164
10.4 Conclusion 173

10.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre deux expérimentations ayant pour objectif de mettre en lumière le caractère adaptatif des conducteurs. Ces expérimentations reposent sur des tâches similaires de poursuite visuo-manuelle où les sujets manipulent un dispositif d'interaction dont les caractéristiques évoluent au cours du temps. La première expérimentation se place dans un contexte simplifié tandis que celui de la seconde est plus écologique à la conduite.

10.2 Contexte simplifié

Cette première expérimentation a pour but d'observer et mesurer les performances adaptatives d'un opérateur réalisant une tâche de poursuite visuo-manuelle où certaines caractéristiques de l'environnement changeront inopinément.

10.2.1 Matériels et méthodes

Le dispositif expérimental intègre le bras robotique à retour d'effort Virtuose 6D35-45 de la société $Haption^{TM}$ (voir figure 10.1). Ce périphérique a été développé principalement pour des applications d'assemblage en environnement virtuel. Sa cinématique autorise des mouvements à six degrés de liberté (trois translations et trois rotations). Les forces générées au niveau de l'organe terminal peuvent atteindre $10N$ en translation continue avec des pointes à $35N$. Les niveaux de couple pouvant être atteints sur les trois axes de rotation sont respectivement de $1N.m$ en continu et $3.1N.m$ en pointe. Un environnement



FIGURE 10.1 – Bras à retour d'effort $Haption^{TM}$ utilisé au cours de l'expérimentation. Ce périphérique est capable de produire des efforts linéaires d'un niveau de $10N$ en continu avec des pointes pouvant atteindre $35N$.

virtuel est projeté sur un écran où figurent deux pointeurs, l'un représentant la cible à poursuivre, l'autre la position courante du sujet manipulant le périphérique à retour d'effort (voir figure 10.2). Ce contexte visuel est généré par le logiciel $Virtools^{TM}$, le moteur physique $Vortex^{TM}$ est alors en charge de résoudre les équations de la dynamique. Le système mécanique virtuel mani-



FIGURE 10.2 – Environnement visuel projeté aux sujets. Le disque jaune représente la position de la cible, le carré rouge celle de la masse virtuelle. Les déplacements sont contraints en translation latérale.

pulé est un simple système "masse-ressort-amortisseur" à un degré de liberté et où seulement un mouvement de translation est autorisé. L'état de la masse virtuelle est associé à celui de l'organe terminal du bras robotique. La longueur à vide du ressort est nulle, ainsi tout déplacement de la masse virtuelle au-delà de sa position centrale de repos génère à la fois une force de rappel linéairement dépendante de l'écartement de la position masse virtuelle ainsi qu'un frottement visqueux s'opposant à tout déplacement. Le ressort présente une raideur à deux états qui est modifiée au cours de la réalisation de la tâche de poursuite. La raideur en condition nominale est de $30N/m$ et atteint $90N/m$ en condition altérée. Les caractéristiques numériques sont reportées dans le tableau 10.1. Comme le rappelle Hanneton (Hanneton, 1999), la prédictibilité de la trajec-

Condition	Raideur en $N.m^{-1}$	Viscosité en $N.s.m^{-1}$	Masse en Kg
Nominale	30	1	0.5
Altérée	90	1	0.5

TABLE 10.1 – Caractéristiques des composants du système mécanique virtuel.

toire de la cible influence la performance de poursuite. La capacité d'un sujet à anticiper la position future d'un objet en mouvement peut être de différentes natures. Ainsi Poulton (Poulton, 1952) distingue l'anticipation du récepteur de l'anticipation perceptuelle. L'anticipation du récepteur décrit l'aptitude d'un opérateur à utiliser un signal préparatoire pour prédire l'évolution de la cible.

Ainsi il peut s'agir pour une tâche de poursuite visuo-manuelle d'une ligne de défilement ou dans le contexte de la conduite, de l'utilisation du marquage au sol. Par ailleurs, l'anticipation perceptuelle caractérise la capacité de prédire le mouvement futur d'une cible en particulier à partir de ses mouvements passés et présents. Ainsi, une cible se déplaçant de manière répétitive et à basse vitesse sera plus commodément prédictible pour un opérateur que dans le cas d'un déplacement rapide et aléatoire.

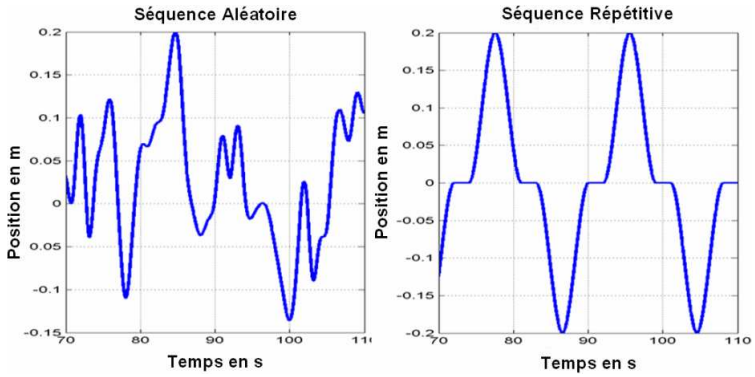


FIGURE 10.3 – Influence de la prédictibilité de la trajectoire de la cible sur la performance de poursuite des sujets. Les profils de trajectoire de la cible en condition aléatoire (à gauche) et répétitive (à droite) sont présentés ci-dessus. Le choix de ce second profil fut motivé par la volonté de minimiser les erreurs de poursuite issues d'une mauvaise anticipation des déplacements de la cible.

Dans la présente étude, nous avons souhaité réduire au maximum les erreurs de poursuite des sujets causées par des prédictions inexactes de la trajectoire de la cible qu'ils devaient poursuivre. Ainsi, nous avons opté pour une trajectoire répétitive dont le motif (que nous nommerons par la suite séquence) est composé de splines à quatre points. Cette séquence est symétrique et représente un aller-retour de cible vers la droite de l'opérateur suivi d'un second aller-retour mais cette fois-ci dans le sens inverse. Entre chaque aller-retour, la cible s'immobilise en position centrale pendant $2s$. Toutefois, nous avons confronté nos sujets à un autre type de trajectoire pour la cible, celle-ci étant générée de manière aléatoire puis filtrée pour éliminer le contenu fréquentiel supérieur à $10Hz$. Les vitesses de pointe de la cible selon les deux profils en question (voir figure 10.3) sont similaires, de l'ordre de $10cm/s$ chacune. Par ailleurs, le système mécanique virtuel manipulé était dans les deux cas le même et n'a subi aucune modification de ses paramètres. L'apprentissage de la tâche a eu pour effet d'améliorer la performance des sujets par une réduction de moitié du RMS de poursuite.

Tâche

Il fut proposé aux sujets une tâche de poursuite visuo-manuelle où ceux-ci contrôlaient, à travers l'organe terminal du bras manipulateur, la position du curseur rouge. Le dispositif expérimental fut calibré de manière à ce que les déplacements du sujet s'étendent sur une plage de longueur de $\pm 20cm$. Cela permettait de s'assurer que le niveau d'effort généré en position extrême et en condition altérée reste dans les possibilités du bras robotique. Les sujets se tenaient droits, face à l'écran de projection, le bras à retour d'effort étant placé entre l'écran et le sujet. Afin de réduire leur sensation de fatigue et d'éviter une éventuelle asymétrie droite/gauche, les sujets furent contraints de maintenir l'organe terminal du bras robot avec les deux mains. L'expérimentation fut scindée en quatre phases avec un temps de récupération de l'ordre de 5 minutes selon les désirs des sujets :

- Familiarisation. Durant cette phase, les sujets purent découvrir et interagir avec le dispositif expérimental en condition nominale et ce pendant 10 minutes.
- Session 1. Réalisation de la tâche de poursuite par les sujets en condition nominale.
- Session 2. Réalisation de la tâche de poursuite par les sujets en condition nominale pendant la première moitié de la phase (6 séquences) puis en condition altérée pendant la seconde (6 séquences).
- Session 3. Réalisation de la tâche de poursuite par les sujets en condition altérée pendant la première moitié de la phase puis en condition nominale pendant la seconde.

Mesure de performance

La quantification de la performance des sujets dans la réalisation de la tâche peut être réalisée par divers indicateurs. Notre objectif étant de comparer l'évolution de la performance de poursuite de la cible par le sujet, nous avons eu recours à deux critères classiques pour ce type d'étude, le RMS (Toffin et al., 2007, Ranjitkar et al., 2005) et le cœfficient de corrélation (Shadmehr et Mussa-Ivaldi, 1994). Le RMS ou *Root Mean Square* mesure la distance quadratique moyenne entre deux signaux. Généralement, l'un des signaux est dit de référence et l'autre est celui à comparer. Soit deux signaux $X = \{Xi\}_{i=1..n}$ et $Y = \{Yi\}_{i=1..n}$.

$$RMS(X,Y) = \sqrt{\frac{1}{n}.\sum_{i=1}^{n}(Xi - Yi)^2} \tag{10.1}$$

Le cœfficient est quand à lui donné par (nn notant $\bar{X}$, respectivement $\bar{Y}$, la valeur moyenne de X, respectivement Y) :

$$Corr(X,Y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Xi - \bar{X}).(Yi - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Xi - \bar{X})^2}.\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Yi - \bar{Y})^2}} \tag{10.2}$$

Le RMS et le cœfficient de corrélation ont été calculés en utilisant comme signal de référence la trajectoire de la cible reflétant à notre sens la trajectoire idéale de suivi par l'opérateur. L'évolution de performance entre deux séquences successives peut être évaluée non pas de manière absolue mais relative en utilisant comme séquence de référence celle précédant directement la séquence courante. Les résultats obtenus s'avérent similaires.

10.2.2 Résultats et discussion

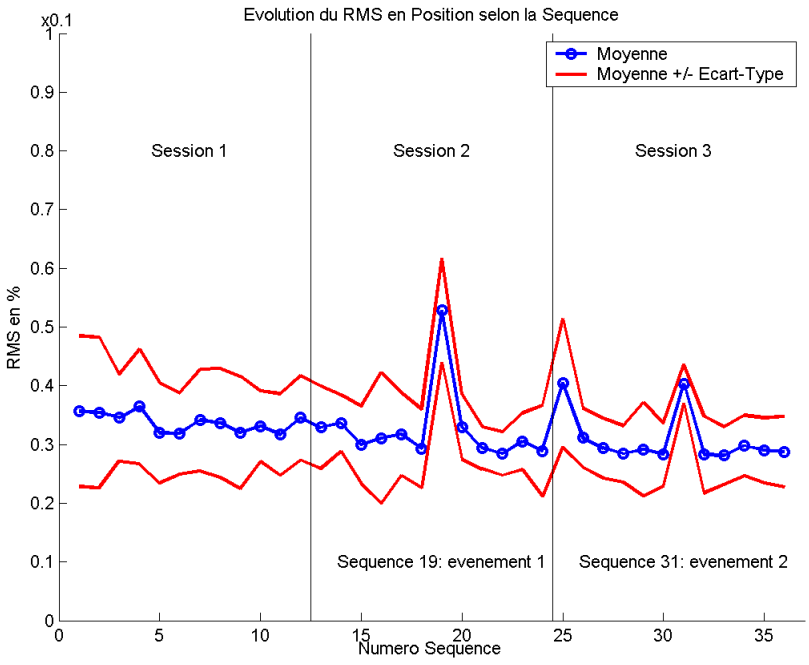


FIGURE 10.4 – Evolution de la performance moyenne de poursuite (RMS).

Concernant le niveau d'erreur mesuré lors de la séquence suivant immédiatement l'occurrence du second évènement, nous remarquons que l'amplitude relative de celui-ci est moindre par rapport au premier évènement. Différentes hypothèses peuvent alors être avancées. Premièrement, la détection du second événement par les sujets fut quasi immédiate alors qu'il leur nécessita quelques

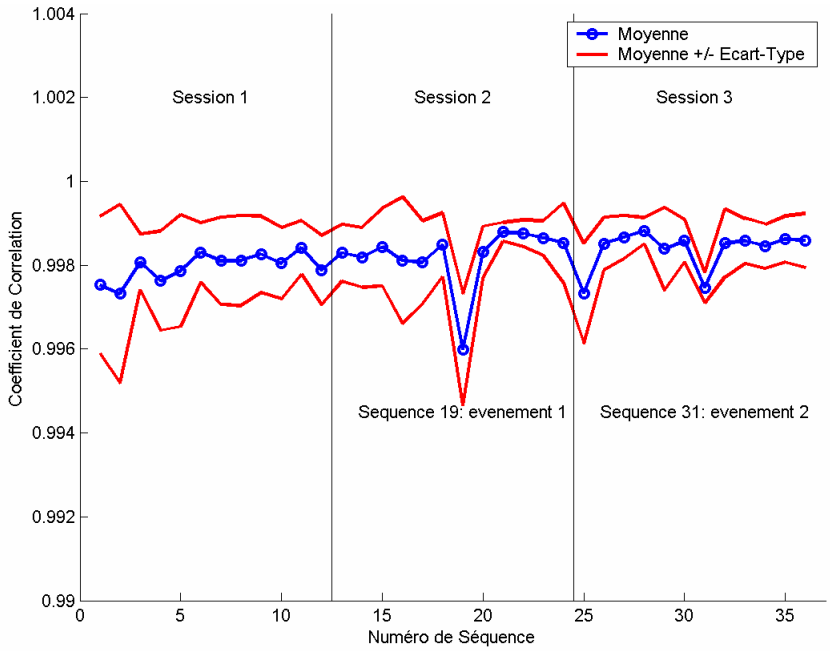


FIGURE 10.5 – Evolution de la performance moyenne de poursuite (Corrélation).

secondes pour celle du premier événement. Le fait que la détection consciente de la modification du système manipulé soit plus rapide peut alors avoir une incidence sur la rapidité de réaction et de modification de la stratégie de contrôle mise en place. Notons que si les sujets étaient naïfs quant à l'occurrence du premier événement, il n'en était pas de même vis-à-vis du second. Le fait que les sujets puissent s'attendre à une éventuelle modification du retour d'effort peut ainsi biaiser l'effet attendu. Une seconde possibilité peut provenir de la stratégie de contrôle employée. Si le premier événement génère une nouvelle configuration du système pour le sujet dans le sens où le dernier ne l'a jamais expérimentée auparavant, le second restaure un système familier. Il est alors envisageable de penser que le sujet a conservé les connaissances relatives à la première configuration. Il détecte et reconnaît alors un système connu et commute sur un jeu de paramètres déjà établi et adapté au nouveau contexte. Cette stratégie a été largement étudiée pour les pilotes d'avions (Miller et Elkind, 1967) dont les capacités de détection, d'identification et de commutation entre différents modes de fonctionnement s'avèrent, de par leur entraînement, extrêmement rapides et efficaces.

Il s'avère difficile de discriminer les stratégies d'adaptation mises en place

par les sujets pour faire face aux changements de raideur du système virtuel manipulé. Le modèle développé au chapitre 8 peut être aisément adapté au présent contexte et permettre ainsi de tester les différentes hypothèses proposées plus haut. Nous calibrons ainsi le modèle de conducteur proposé afin que ses performances (niveau de RMS) en condition nominale soient similaires à celles mesurées lors de l'expérimentation. Les différentes hypothèses d'adaptation testées sont :

1. Aucune adaptation.
2. Adaptation de la boucle d'impédance seulement.
3. Adaptation de la boucle de poursuite seulement.
4. Adaptation simultanée des boucles de poursuite et d'impédance.

Selon l'hypothèse de non adaptation, nous observons que le modèle prédit une augmentation du niveau d'erreur de poursuite (RMS) dont le niveau est constant tout au long de la condition altérée (voir figure 10.6). Lorsque le système re-bascule en condition nominale, le niveau d'erreur retrouve sa valeur antérieure. Il apparaît que cette prédiction est en contradiction avec les observations expérimentales (voir figure 10.4).

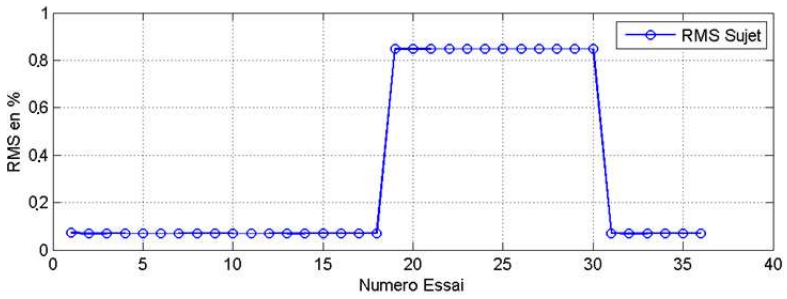


FIGURE 10.6 – Prédiction de la performance de poursuite (RMS), hypothèse de non adaptation.

Pour la seconde hypothèse, la vitesse de mise à jour de la boucle d'impédance est telle que les niveaux maximaux de raideur et de viscosité apparentes est atteint en $1s$, valeur suffisante pour que le recrutement de la totalité des fibres musculaires soit réalisé. Le modèle prédit une augmentation du niveau d'erreur (RMS) qui atteint un pic lors de l'essai faisant immédiatement suite à la modification de raideur du système virtuel. Mais ce niveau d'erreur diminue par la suite pour atteindre un niveau constant mais supérieur au niveau correspondant à la condition nominale (voir figure 10.7). Cette stagnation du niveau d'erreur est propre à la structure de la boucle d'impédance qui est identique à celle d'un correcteur proportionnel-dérivé (P-D). Ce type de correcteur

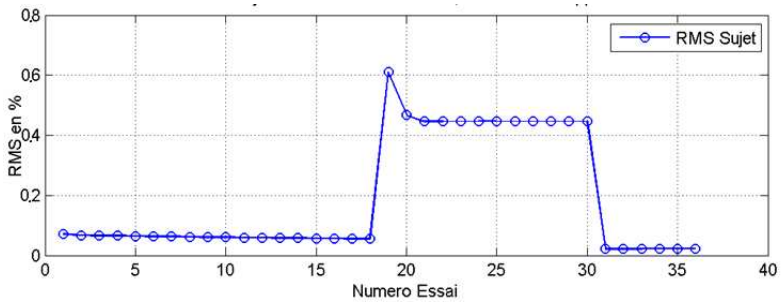


FIGURE 10.7 – Prédiction de la performance de poursuite (RMS), hypothèse de mise à jour de la boucle d'impédance.

présente un écart systématique de suivi de consigne lorsque celle-ci est de type échelon, ce qui est la cas dans notre contexte. L'amplitude de cet écart statique est directement liée à la valeur du gain proportionnel P. Plus celle-ci est élevée, plus l'écart statique sera faible. En théorie, une valeur suffisamment élevée de P peut réduire l'erreur de poursuite à une valeur quasi nulle, ce qui n'est physiologiquement pas possible de par les limitations des caractéristiques musculaires. Tout comme pour l'hypothèse de non adaptation, la prédiction du modèle est en désaccord avec les observations expérimentales.

La troisième hypothèse stipule que le sujet possède une représentation interne plastique du système virtuel manipulé. Ici, nous choisissons une vitesse de mise à jour de cette représentation interne telle qu'elle puisse être achevée sur la durée d'une séquence. Le modèle prédit une dégradation de la performance de poursuite qui, une fois la mise à jour de la boucle de poursuite achevée, retrouve son niveau nominal. De même, lorsque le système virtuel retrouve sa configuration initiale, la performance de poursuite est altérée mais corrigée au terme d'une séquence de poursuite (voir figure 10.8). Nous observons une dis-

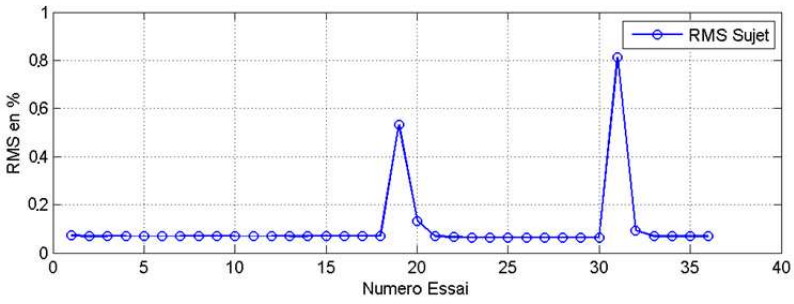


FIGURE 10.8 – Prédiction de la performance de poursuite (RMS), hypothèse de mise à jour de la boucle de poursuite.

symétrie dans l'évolution de la performance de poursuite liées à la hausse et la baisse de raideur du système virtuel manipulé. Ceci peut s'expliquer par le fait que le niveau d'effort anticipé et produit par la boucle de poursuite est surdimensionné par rapport à la quantité nécessaire (séquence 31) et que l'erreur de poursuite est donc initialement plus importante que dans le cas où ce niveau d'effort est sous dimensionné (séquence 19). Le comportement prédit par le modèle est cohérent avec les observations expérimentales seulement pour l'augmentation de la raideur du système manipulé. En effet, la dégradation de performance de poursuite lors de la première séquence de la troisième session ainsi que la variation d'amplitude du niveau d'erreur obtenus pour les séquences 19 et 31 sont en contradiction avec les prédictions du modèle.

Enfin, la mise en place de la quatrième hypothèse fournit des résultats identiques à ceux obtenus précédemment (voir figure 10.9). En particulier, nous observons une dégradation de la performance de poursuite lors du deuxième évènement (séquence 31) supérieure à celle prédite lors du premier (séquence 19). Les résultats prédits par le modèle et présentés précédemment permettent

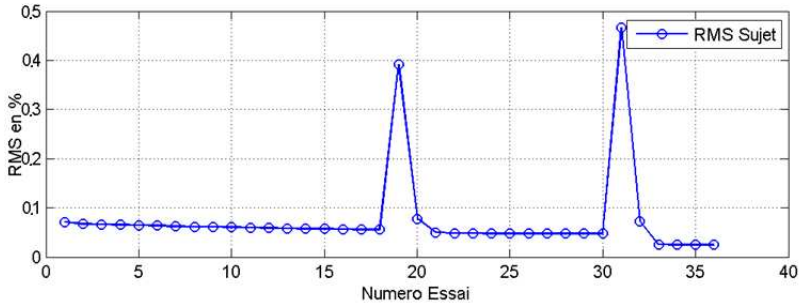


FIGURE 10.9 – Prédiction de la performance de poursuite (RMS), hypothèse de mise à jour simultanée des boucles de poursuite et d'impédance.

une appréciation quantitative des différentes stratégies d'adaptation possibles. Notons bien qu'il s'agit ici de démontrer l'intérêt d'un modèle adaptatif de comportement des sujets pour la compréhension des résultats expérimentaux observés. Une étude plus fine permettrait d'obtenir des jeux de paramètres plus représentatifs et des prédictions de meilleure qualité.

Toutefois il nous est possible de rejeter certaines hypothèses comme l'absence d'adptation ou encore le recours exclusif à la modulation d'impédance pour la tâche de poursuite proposée. Nous remarquons par ailleurs certaines incohérences entre les prédictions et observations expérimentales (séquences 25 et 31) qui peuvent être expliquées par la non prise en compte par le modèle d'un mécanisme de mémorisation et de commutation entre différents paramétrages

de la boucle de poursuite établis antérieurement.

10.3 Contexte automobile

Les constructeurs d'automobiles proposent aujourd'hui une large gamme de systèmes d'aide à la conduite. La compréhension par les conducteurs du fonctionnement de ces systèmes est, rappelons-le, un défi majeur qui se doit d'être relevé. Lorsque le comportement du système d'assistance s'avère être différent de celui attendu par le conducteur, la situation devient alors potentiellement dangereuse. En particulier, quand une défaillance de ce système survient, la question de la réaction du conducteur devient primordiale. Dans l'expérimentation qui suit, nous étudions les effets sur le conducteur d'un comportement inattendu de la direction assistée électrique (DAE) lorsque celui-ci réalise une tâche de conduite basique. Le système étudié (DAE) réduit le couple que le conducteur doit fournir pour manœuvrer le volant de son véhicule.

Nous nous intéressons ici à une perte soudaine et permanente de ce couple d'assistance ce qui a pour effet de rendre le volant plus difficile à tourner. Dans une telle situation, différentes réactions du conducteur sont envisageables. La hausse soudaine de couple au volant peut être contrée par le conducteur de manière à ce qu'il puisse poursuivre sa tâche de conduite ou bien au contraire rendre le véhicule instable et provoquer une sortie de route. La première hypothèse peut résulter de propriétés propres au conducteur. Comme nous l'avons vu au chapitre 5, différentes stratégies peuvent être mises en œuvre. La robustesse naturelle du système neuro-musculaire peut se révéler suffisante pour rejeter la perturbation de couple volant. De plus, Pick et Cole (Pick et Cole, 2004) ont mesuré une augmentation de l'impédance apparente des bras de conducteurs lors de manœuvres de changement de file. En outre, l'augmentation soudaine du couple au volant peut être compensée par une mise à jour de la représentation interne que le conducteur possède de son volant. L'aptitude des conducteurs à s'adapter à des modifications inattendues de la loi de retour d'effort volant a en particulier été observée lors de conduites sur simulateur (Toffin et al., 2007). Toutefois, les modifications de couple avaient lieu lors d'une conduite en ligne droite, précédant l'entrée dans un virage, ce qui ne provoquait pas de variation brusque de couple au volant. Dans notre expérimentation, la variation de couple est brusque et apparaît lors d'une conduite en virage établi.

Par ailleurs, la situation dans laquelle intervient l'évènement volant (conduite en virage en présence de trafic routier) peut être source de stress et donc impacter la performance de contrôle du conducteur. Bien que ce type de stress soudain, consécutif à un événement inattendu, peut être rapidement régulé

(Matthews, 2002), il peut se révéler d'autant plus important que la difficulté de compréhension de la situation croît. Par ailleurs, les stratégies impliquées dans la régulation de ce stress peuvent provoquer une augmentation de l'état de charge mentale (Westman, 1990). Une telle variation de la charge mentale peut alors réduire la taille du champ visuel fonctionnel (E.M. Rantanen, 1999) utilisé dans la détection et la reconnaissance d'objets de environnants. Ainsi, le stress provoqué par l'événement volant peut dégrader la tâche de conduite en particulier en termes de réduction de performance visuelle.



FIGURE 10.10 – Simulateur de conduite ULTIMATE - RENAULT, Centre Technique de Simulation.

10.3.1 Matériels et méthodes

Cette expérimentation fut réalisée sur le simulateur dynamique de conduite ULTIMATE (voir figure 10.10) développé par le Centre Technique de Simulation (CTS) de RENAULT, dans le cadre d'un projet de recherche européen (Eureka # 1493, partenaires : RENAULT, SEOS Ltd., Rexroth-Hydraudyne, CNRS-LPPA). L'environnement visuel principal est assuré par trois projecteurs DLP qui créent sur un écran cylindrique embarqué une image de 150°x40°. Deux écrans LCD prennent place au niveau des rétroviseurs extérieurs. Le cockpit est placé sur une plateforme hexapode Hydraudyne offrant 6 degrés de liberté, elle-même montée sur un rail XY augmentant la zone de travail pour les translations longitudinales et latérales. L'ensemble est piloté par le logiciel SCANeR© II développé initialement au CTS en coopération depuis 2005 avec OKTAL. Ce

logiciel gère, entre autres, le trafic routier, l'enregistrement des données expérimentales, la réalisation de scenarii, etc. La validation des performances du simulateur est réalisée à différents niveaux, de la restitution de mouvement par la plateforme dynamique à la précision du modèle de dynamique véhicule, au travers de critères tant objectifs que subjectifs (Dagdelen et al., 2006). La restitution de couple au niveau du volant est assurée par une direction assistée électrique de véhicule de série. Cet élément conçu initialement pour produire un couple d'assistance est ici utilisé pour générer un couple résistif.

Dix sujets ont participé à cette expérimentation (âge de 23 à 28 ans). Ils étaient tous détenteurs du permis de conduire depuis plus de deux ans et travaillaient tous chez RENAULT.

Entraînement

Les sujets n'étant pas utilisateurs de simulateurs de conduite, une séance d'entraînement fut mise en place. Cette séance était composée de deux parties. Lors de la première partie, les sujets conduisaient sur une surface sans aucune délimitation ni de marquage au sol. Il leur fut demandé de réaliser à différentes vitesses des virages à droite et à gauche ainsi que des slaloms (mouvements volant de type sinusoïdal, de fréquence $1Hz$ et d'amplitude absolue 30°). Cette première partie eut pour objectif de familiariser les sujets avec le moyen d'essai et en particulier avec la dynamique du véhicule virtuel piloté ainsi que le niveau de restitution des mouvements. La seconde partie de la session d'entraîment fut une conduite libre dans l'environnement de test. Cette disposition permit aux sujets de découvrir l'itinéraire à suivre, d'éviter toute surprise liée à l'environnement, au trafic, etc.

Tâche

Les sujets se virent proposer une double tâche : conduire aussi naturellement que possible à la vitesse de 70 km/h et identifier la présence de certains objets (des cyclistes) dans l'environnement virtuel. Dans ce type d'expérimentation, le respect de la consigne de vitesse est généralement obtenu par l'ajout d'un véhicule dit lièvre, évoluant à la vitesse de consigne et que le sujet doit suivre. Ceci étant, nous ne préférons pas avoir recours à ce type de solution pour éviter une trop importante concentration des sujets sur le suivi du véhicule lièvre, au détriment de la tâche secondaire. La conduite eut lieu en environnement rural, sur une route nationale avec un trafic ambiant léger. Le virage étudié présentait un rayon de courbure de $100m$ (voir figure 10.11). Chaque session de conduite durait approximativement 5 minutes. Lors de l'expérimentation, la position des cyclistes "cachés" était différente à chaque nouvelle session mais identique pour tous les sujets. L'événement volant était une hausse soudaine et permanente

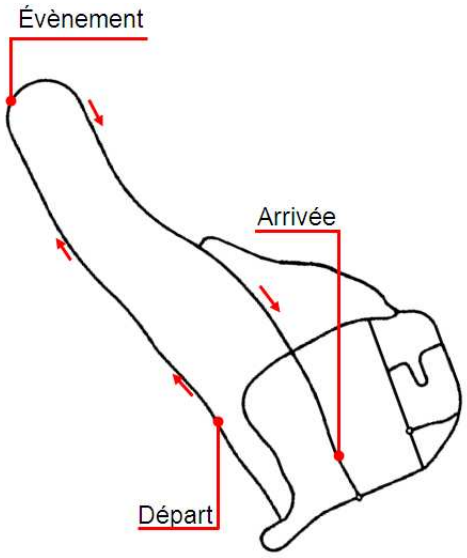


FIGURE 10.11 – Chaque session débute sur une route rurale en ligne droite. Le sujet rencontre après près de 2 minutes de conduite un virage à droite de $100m$ de rayon. L'évènement volant a lieu alors que le sujet est en virage établi depuis quelques secondes seulement. La session se termine à environ 2 minutes après la sortie du virage.

du couple volant pouvant alors être interprété comme un dysfonctionnement de la direction assistée. Le niveau nominal de couple au volant à la vitesse de consigne et dans le virage de test était de l'ordre de $3N.m$ pour atteindre $6N.m$ après altération. La modification du couple volant était opérée lorsque le conducteur était au niveau du troisième camion sur le côté droit de la route.

Mesure de performance

Les données ont été enregistrées par le logiciel SCANeR© II et échantillonnées à la fréquence de $20Hz$. Deux types d'indicateurs furent employés. L'évolution de la performance de contrôle des conducteurs est établie à partir de critères objectifs dont la liste est la suivante :

- Déviation latérale. Il s'agit d'un indicateur élémentaire pour identifier les sorties de voie ou de route (Östlund et al., 2005).
- $Time-to-Lane-Crossing$. Cet indicateur représente le temps nécessaire au véhicule pour quitter la voie. Cet indicateur est alors considéré comme une marge de sécurité sur laquelle le conducteur fonde son contrôle (Godthelp, 1986).
- *Steering Wheel Reversal Rate* ($SWRR$). Cette mesure dénombre les

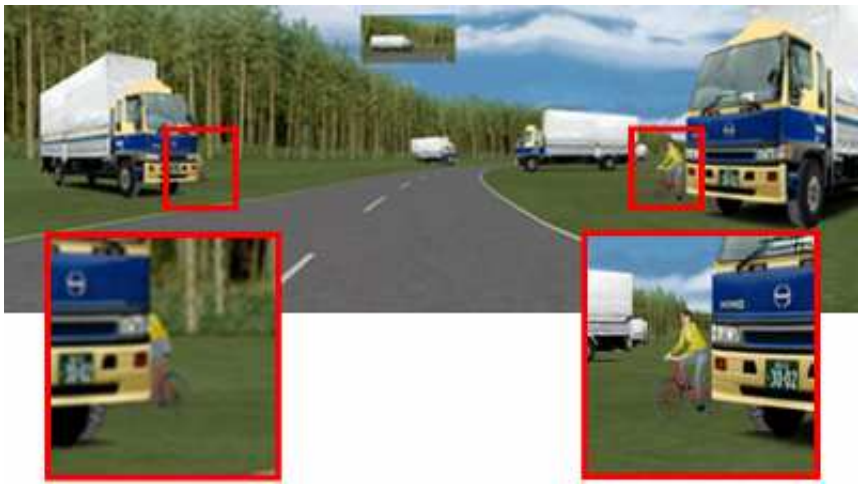


FIGURE 10.12 – Environnement visuel avant l'occurrence de l'événement volant. Deux cyclistes "cachés" sont présents au niveau des deux premiers camions sur le bas-côté.

changements de sens de variation du volant (Östlund et al., 2005). Le SWRR permet de rendre compte de changements dans le contenu fréquentiel du contrôle du volant par le conducteur.

– *Steering Entropy* (SE). La mesure d'entropie de l'angle volant permet de caractériser à la fois des styles de conduite mais aussi des variations de performance de contrôle (Boer, 2005b). Une augmentation du SE peut s'interpréter comme une modification de la charge mentale allouée à la tâche de conduite, modification dont l'origine peut être due à la mise en place de nouvelles tâches comme le processus d'adaptation sensorimotrice par exemple.

Ces différents indicateurs sont détaillés dans l'annexe B. Le $SWRR$ et le SE sont particulièrement adaptés pour quantifier la performance de contrôle de conducteurs dans des contextes multi-tâches et de longues conduites. Leur pertinence pour évaluer les effets d'événements critiques de courte durée n'est pour le moment que peu établie.
L'étude subjective porte sur la mesure :

– du stress perçu par les conducteurs,
– de la performance de détection et de reconnaissance d'objets dans l'environnement,
– de la compréhension de la situation (seulement lors de l'essai où survient l'événement volant).

Cette étude repose sur des indicateurs issus de questionnaires que les sujets remplissent à la fin de chaque essai. Pour certaines questions, les conducteurs

devaient fournir une note entre 0 et 7. Le test du Phi^2 (Rouanet et Roux, 1995) fut utilisé pour mesurer la corrélation entre la qualité de la détection des objets de l'environnement et l'événement inattendu. Ce test permet de quantifier l'indépendance entre deux variables lorsque que le nombre de sujets (conducteurs) est réduit.

10.3.2 Résultats et discussion

Critères objectifs

Déviation latérale. La déviation latérale du véhicule est mesurée à partir du bord droit de la route. Ainsi, une valeur négative de déviation latérale signifie une sortie de route à droite. Une augmentation de cette grandeur signifie que le véhicule se rapproche du côté gauche de sa voie et donc de la route. Nous avons pu observer et vérifier avec les données expérimentales qu'aucun conducteur n'est sorti de sa voie et ce pour l'intégralité des essais. L'événement de couple volant n'a pu empêcher les conducteurs de réaliser leur tâche de conduite dans le virage de test. Nous avons par ailleurs mesuré pour chaque sujet et à chaque essai, une variation de la position latérale sur la voie au cours du virage de l'ordre de $30cm$. Cette variation naturelle est propre à la stratégie de contrôle des conducteurs. Toutefois, nous avons pu observer une augmentation systématique (pour tous les sujets) de la position latérale moyenne du véhicule après l'occurrence de l'événement volant. L'augmentation soudaine de couple a pour effet de ramener le volant vers sa position neutre et ainsi réduire la courbure de la trajectoire du véhicule (et donc d'augmenter la position latérale sur la voie). Nous pouvons alors émettre deux hypothèses. Soit le conducteur décide, dans une démarche sécuritaire, de s'éloigner du bord droit de la route afin de recentrer son véhicule sur la voie. Soit la secousse due à l'occurrence de l'événement volant dévie le véhicule sur le coté gauche de la voie, déviation rapidement contrée et stabilisée par le conducteur mais l'écart par rapport à l'ancienne position moyenne n'est pas corrigé.

TLC. La mesure du TLC fut réalisée par une routine interne du logiciel SCANeR© II. Pour chaque essai et pour chaque sujet, nous avons mesuré le nombre d'extremums locaux ainsi que l'amplitude entre un minimum et un maximum successifs. L'impact de l'événement volant s'est révélé difficilement observable même si la valeur du TLC minimum suivant l'occurrence de la perturbation est supérieure à celle obtenue dans les autres essais à ce niveau du virage. Si les profils de TLC étaient similaires, nous avons par ailleurs observé un aplatissement (réduction de l'écart entre deux extremums successifs) de ces derniers en cours du virage (voir figure 10.13) plus important pour la condition perturbée. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la raideur apparente du

volant et donc par une réduction de l'amplitude des variations naturelles dans le contrôle de celui-ci. Pour le second conducteur (voir figure 10.14), l'événement volant a provoqué une diminution notable du TLC qui fut corrigée en moins de trois secondes (retour à un profil et à une gamme de valeurs de condition non perturbée).

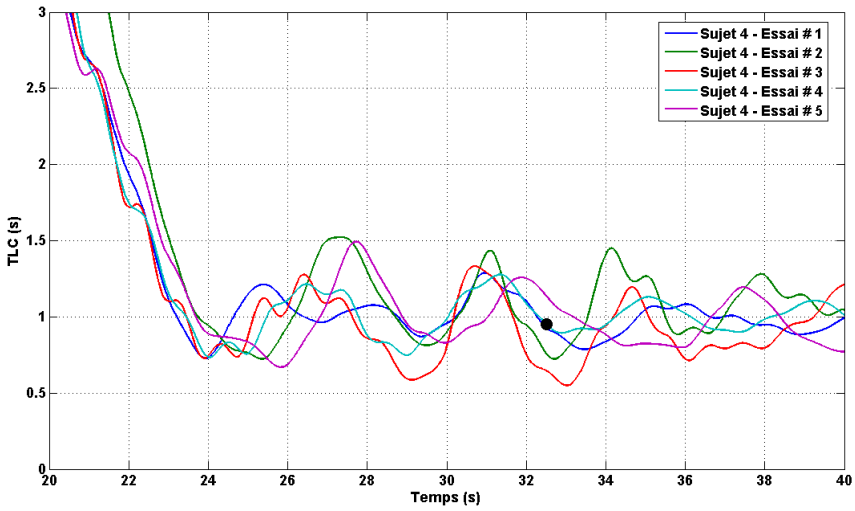


FIGURE 10.13 – Profils de TLC pour le conducteur n°4. L'impact de l'événement volant sur les variations de la métrique et ses extremums est difficilement observable. La pastille noire repérsente l'instant d'occurrence de l'événement.

Steering Entropy. Ce critère a été calculé selon la manière décrite en annexe B à partir de l'entrée en virage jusqu'à la sortie. Pour chaque sujet, le calcul d'entropie du premier essai a servi de référence pour le calcul de l'indicateur aux essais suivants. Nous n'avons pas observé de tendance générale sur la variation du SE pour chaque conducteur (voir figure 10.15) si ce n'est que le SE minimum pour les différents sujets est supérieur dans la condition perturbée (quatrème essai) aux SE minimums des autres essais (condition nominale). Ainsi, près de 60% d'entre eux présentent une augmentation du critère alors que pour les autres celui-ci diminue.

Steering Reversal Rate. Pour le calcul de ce critère, nous avons choisi de dénombrer les changements de direction de l'angle volant ayant une amplitude entre deux extremums successifs supérieure à 2°. Lors du quatrième essai (occurrence de l'événement volant) les conducteurs maintenirent le critère à son niveau en condition nominale (moyenne de 0.2 changement/s, écart-type de 0.03 changement/s).

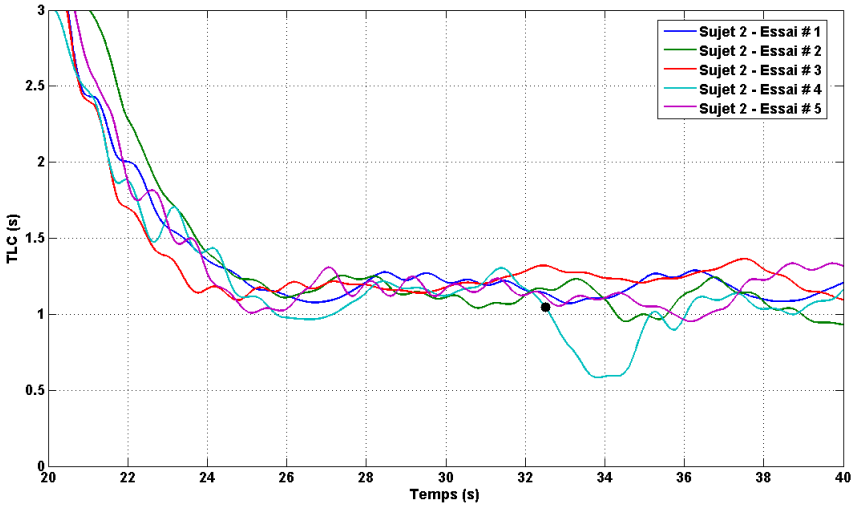


FIGURE 10.14 – Profils de TLC pour le conducteur n°2. L'événement volant provoque une diminution soudaine du TLC corrigée par le conducteur en moins de trois secondes. La pastille noire repérsente l'instant d'occurrence de l'événement.

Critères subjectifs

Stress perçu par les conducteurs. Aucun sujet n'a signalé une quelconque difficulté à conduire le simulateur, la note moyenne étant de 5.7 sur une gamme de valeurs allant de 0 à 7, la note maximum signifiant dans le questionnaire "aucune difficulté rencontrée". De plus, aucun n'a souffert du mal du simulateur. Lors des conduites en condition nominale, le niveau de stress perçu par les conducteurs fut très faible (note moyenne de 1.3 sur une gamme de valeurs de 0 à 7 où 0 signifie "pas de stress pendant la conduite"). A contrario, ce niveau de stress augmenta suite à l'apparition de l'événement volant (note moyenne de 3.2). Toutefois, aucun conducteur n'a décidé de stopper sa tâche de conduite

Qualité de la détection des objets. Les conducteurs démontrèrent une plus grande facilité à détecter et reconnaître les "cyclistes cachés" en condition nominale qu'en condition perturbée. Selon le test du Phi^2, le lien entre le type de session et la détection du cycliste est "intermédiaire". Le couple "session altérée" et "pas de détection du cycliste" contribue le plus au Phi^2 ce qui signifie une probabilité plus importante de "pas de détection du cycliste" lors de cet essai.

Compréhension de la situation. Bien que tous les conducteurs aient ren-

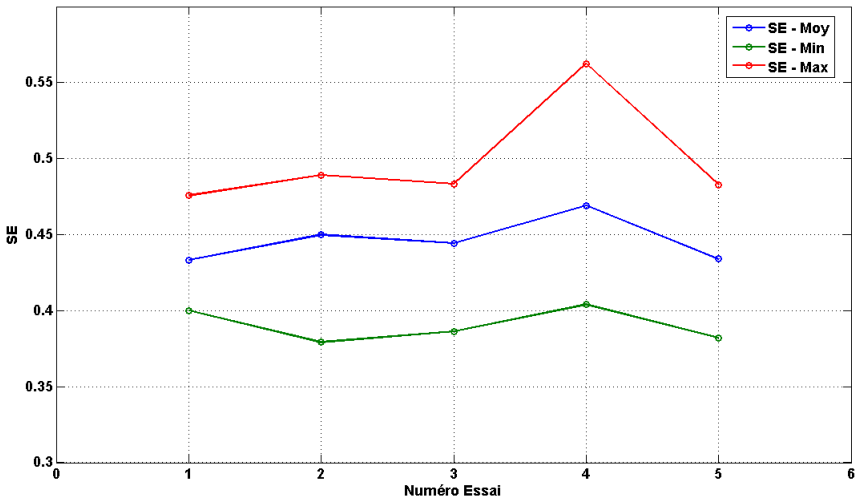


FIGURE 10.15 – Evolution du SE moyen entre les différents conducteurs. Pour près de 60% d'entre eux, l'événement volant provoque une augmentation systématique du critère alors que pour les autres celui-ci diminue.

contré le même événement volant, un seul seulement s'est senti en danger tandis qu'un autre eut peur de percuter l'un des cyclistes. Par ailleurs, deux conducteurs ont admis qu'un tel événement en situation de conduite réelle pourrait se révéler critique. Les conducteurs ont rappelé qu'ils savaient qu'ils se trouvaient dans un environnement simulé et donc totalement sûr. Se pose donc la question de la pertinence de leur réaction par rapport à celle attendue en réel. Enfin, même si tous les conducteurs ont ressenti la hausse soudaine et permanente du couple au volant, seulement l'un d'entre eux l'a reliée à une défaillance de direction assistée. Un autre conducteur a toutefois indiqué que lors de l'essai perturbé, il avait eu l'impression de conduire "son ancien véhicule" qui en fait ne possédait pas de direction assistée. Il est intéressant de noter que tous les conducteurs qui ont été en mesure de fournir une explication sur la nature de l'événement volant ont rapproché les effets de la perturbation à une situation qu'ils avaient rencontrée auparavant sur un véhicule réel.

Rappelons que les différents résultats présentés ici ont été obtenus avec un nombre limité de conducteurs et que les tendances observées nécessiteraient des expérimentations supplémantaires afin d'être confirmées ou infirmées. Les différents critères utilisés, qu'ils soient objectifs ou subjectifs, n'autorisent qu'en partie l'évaluation des conséquences de l'événement volant sur la conduite : ils s'avèrent limités quand à la compréhension des processus impliqués dans l'adaptation des conducteurs au nouveau contexte de conduite qui leur est soudainement imposé.

Simulations

Compensation visuelle sans adaptation . Au regard des différentes simulations réalisées et des gammes de valeur des paramètres du modèle utilisé, nous nous apercevons que la contribution de la seule boucle de rétroaction visuelle ne suffit pas à compenser les erreurs de trajectoire provoquées par la modification de la loi de commande du volant ainsi que les inexactitudes induites par l'inadaptation du modèle interne du conducteur. Cet écart statique persistant fait que la correction de la trajectoire n'est basée que sur des informations relatives à l'état courant et à venir (au travers d'une prédiction) du véhicule et n'intègre pas dès lors une correction supplémentaire fondée sur l'accumulation des erreurs de trajectoires au cours des instants écoulés. L'amplitude de cette erreur statique sur l'écart latéral du véhicule sur la voie dépend principalement du niveau d'impédance du conducteur, ici fixé à $10N.m/rad$ (voir figure 10.16). Si cet écart est observé expérimentalement pour certains sujets, il est toutefois difficile de l'imputer à la stratégie décrite ici et ce pour différentes raisons. La première concerne la variabilité de la trajectoire des sujets au cours de la conduite dans le virage, l'écart observé pouvant ainsi être d'origine naturelle, propre aux performances de contrôle des conducteurs. La seconde pourrait provenir d'un changement dans la consigne de trajectoire que se fixe chaque sujet. Ainsi, ces derniers peuvent décider, une fois le véhicule stabilisé, de maintenir leur nouvelle position sur la voie tant que celle-ci est acceptable d'un point de vue sécuritaire (pas de sortie de voie ou de route). Si l'on note un écart de po-

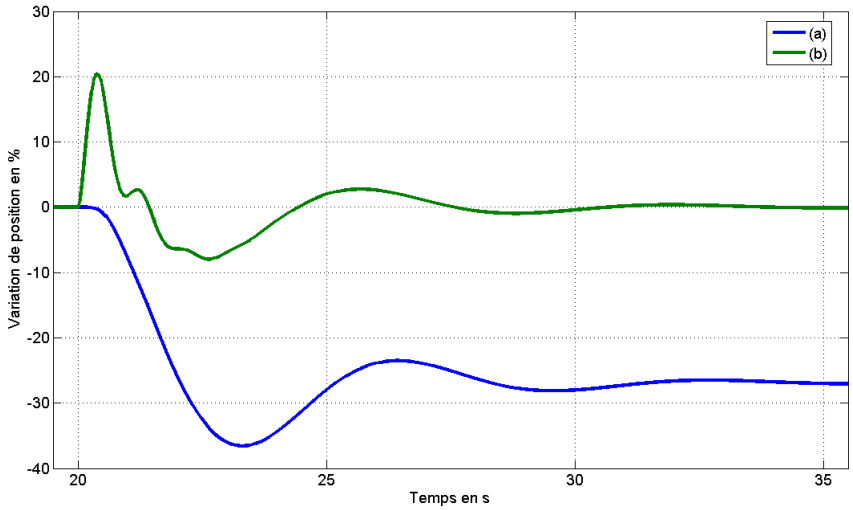


FIGURE 10.16 – Evolutions relatives (en pourcentage) de l'écart latéral du véhicule sur la voie (a) et de l'angle volant (b) lorsque qu'aucun mécanisme d'adaptation n'est activé. La modification de couple survient à l'instant $t = 20s$.

sition sur la voie, le modèle prédit un retour du volant à sa position originelle, en adéquation avec la courbure du virage et la vitesse d'évolution du véhicule. Or, comme nous l'avons vu précédemment, le niveau d'impédance apparente des conducteurs ne peut suffire à assurer un retour à cette position angulaire. La figure 10.17 représente (a) la consigne d'angle volant calculée par le conducteur, (b) sa position réelle et enfin (c) la prédiction par le conducteur de cette position à la vue du couple total appliqué au volant. Ainsi, nous notons que le conducteur est contraint de modifier sa consigne d'angle volant pour que le couple de poursuite résultant permette le retour à la position précédente du volant. Cette situation crée alors une discordance entre la consigne de position d'angle volant et celle réellement atteinte et, de ce fait, influe sur la compréhension du contexte faite par le conducteur. Il peut, en particulier, interpréter l'événement comme une modification non pas au niveau de la loi de retour d'effort mais de la dynamique latérale de son véhicule. De ce fait, l'adaptation en termes de mise à jour de modèle interne peut également intervenir au niveau de l'étape d'anticipation/prédiction où est utilisé un modèle interne de cette dynamique latérale. De plus, dans l'hypothèse où le conducteur possède un modèle direct et figé de la dynamique du système volant (hypothèse effectivement posée dans notre proposition de modèle de conducteur), la prédiction de la position angulaire du volant calculée à partir du niveau de couple qui lui est appliqué peut apporter une nouvelle source d'incohérence entre l'état réel du système et son image interne au conducteur (voire figure 10.17).

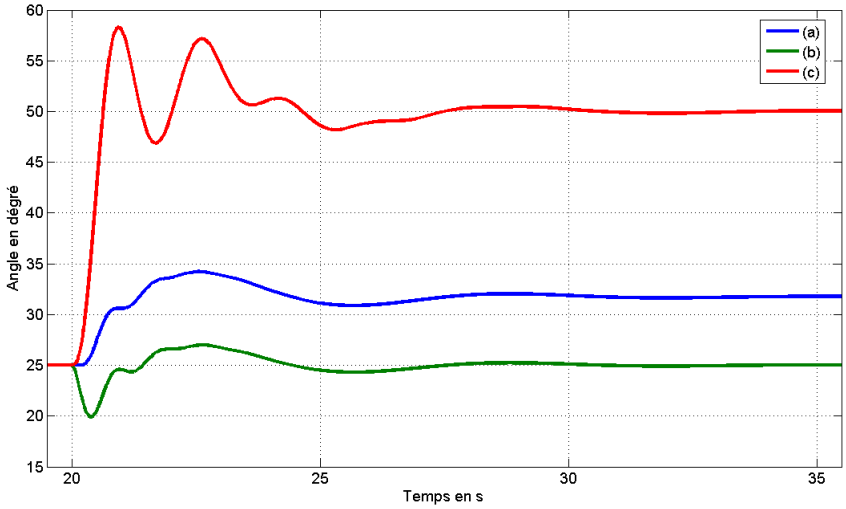


FIGURE 10.17 – Evolutions (a) de la consigne en position de l'angle volant calculée par le conducteur, (b) sa position réelle et enfin (c) la prédiction par le conducteur de cette position au travers de son modèle interne du système volant.

Effets des mécanismes adaptatifs Nous testons maintenant l'impact sur le contrôle du volant et de la trajectoire du véhicule des mécanismes de modulation d'impédance et de mise à jour de modèle interne. Nous présentons ici les résultats pour les trois conditions suivantes :

1. Mise à jour de modèle interne du système volant seulement. L'impédance apparente n'étant alors pas modifiée par le niveau d'erreur entre la position angulaire du volant et celle atteinte réellement. Les paramètres étant : $\mu_{Poursuite} = 1$ et $\mu_{Impedance} = 0$.
2. Modulation d'impédance seulement. Le modèle interne du conducteur décrivant le comportement du système volant est figé. Les paramètres sont alors $\mu_{Poursuite} = 0$ et $\mu_{Impedance} = 15000$.
3. Modulation d'impédance et mise à jour de modèle interne du système volant. Les deux mécanismes adaptatifs sont combinés. Les paramètres étant : $\mu_{Poursuite} = 1$ et $\mu_{Impedance} = 15000$.

Le choix des paramètres $\mu_{Poursuite}$ et $\mu_{Impedance}$ peut paraître arbitraire. Il répond en partie aux besoins suivants : une vitesse d'apprentissage de l'ordre de 5 secondes et une augmentation de la raideur apparente du conducteur à une valeur de l'ordre de $50N.m$ en $2s$ seulement. Par ailleurs, il ne nous est pas paru envisageable de tester de manière plus exhaustive d'autres jeux de paramètres car notre intention était d'observer des comportements caractéristiques dus aux différentes stratégies proposées : contrairement à notre démarche décrite au chapitre 9, nous ne souhaitons ici en aucun cas identifier certains paramètres à partir des mesures et observations expérimentales.

La figure 10.18 représente pour les conditions et paramètres listés précédemment l'évolution de l'écart latéral relatif du véhicule sur la voie. Comme nous pouvions l'envisager, nous observons une variation de plus forte amplitude lorsque seul le mécanisme de mise à jour du modèle interne (a) est employé, celui-ci ayant une dynamique plus lente que celle de la modulation d'impédance. Le fait que la raideur et la viscosité apparentes du conducteur ne soient pas sujet à modification aggrave la situation : une telle amplitude de variation ne serait pas atteinte pour des valeurs de raideur et viscosité plus importantes. La seule modulation d'impédance (b) réduit de manière significative l'amplitude de ce pic mais, à l'instar de la compensation purement visuelle décrite au paragraphe précédent, une erreur de suivi de trajectoire subsiste, directement liée au niveau d'impédance final du conducteur. Nous observons par ailleurs une stabilisation plus rapide de la trajectoire du véhicule du point de vue de ses amplitudes de variation autour de sa valeur finale. Enfin, la combinaison des deux stratégies s'avère bénéfique à la performance de contrôle : les amplitudes de variation de l'écart relatif sur la voie se révèlent être les plus faibles et la

stabilisation de celles-ci plus rapide. Nous présentons à la figure 10.19 l'évolu-

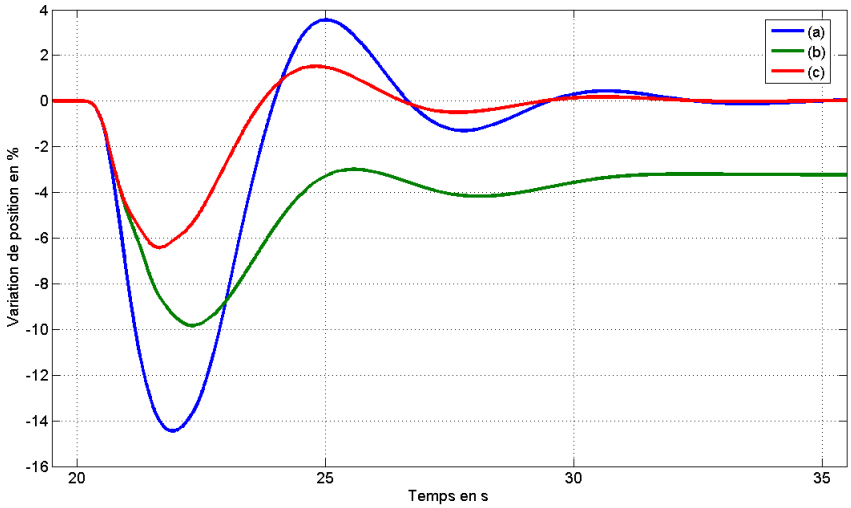


FIGURE 10.18 – Evolutions relatives (en pourcentage) de l'écart latéral du véhicule sur la voie avec (a) mise à jour de modèle interne du système volant seulement, (b) modulation d'impédance apparente seulement et enfin (c) combinaison des deux stratégies d'adaptation.

tion de la position de l'angle volant suite à l'augmentation soudaine de couple. Comme nous avions pu l'observer expérimentalement au cours du chapitre 9, le modèle présente un premier pic de l'angle volant en réponse immédiate à la perturbation de couple, dont les caractéristiques dépendent principalement du niveau d'impédance apparente du conducteur. Ainsi l'amplitude et l'instant d'occurrence de ce pic décroissent à mesure que la raideur et viscosité apparentes augmentent, l'impact du couple de poursuite étant alors restreint. Bien que le temps pour recouvrer un état stable soit plus faible à mesure que l'impédance augmente, nous observons un phénomène oscillatoire notable lors de l'étape transitoire le précédant.

D'après la figure 10.19, il apparaît que le modèle prédit un retour à un état stable au bout d'une dizaine de secondes, ce qui est supérieur aux mesures (de l'ordre de 2 secondes). Toutefois, nous avons vu au chapitre 9 qu'il était cohérent de définir la précision du contrôle à un seuil près compte tenu de la variabilité intrinsèque de la tâche de conduite. Ainsi, pour un seuil de variation de $\pm 2\%$ de l'état final (sur la figure 10.19 ceci correspond à une variation d'angle comprise entre 24.5° et 25.5°), nous nous apercevons que le conducteur stabilise sont volant respectivement en $5.3s$, $2.8s$ et $2.2s$ selon la condition de mise à jour de modèle interne seule, de modulation d'impédance seule et enfin de combinaison de stratégie.

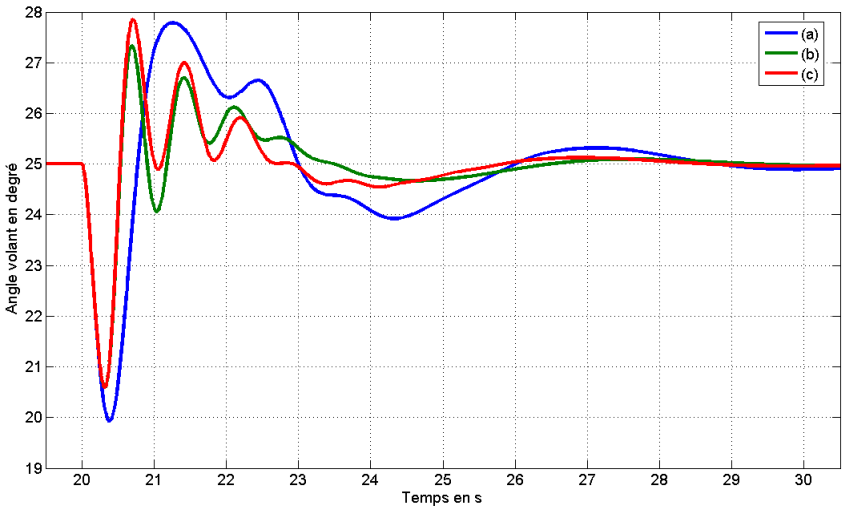


FIGURE 10.19 – Evolution de l'angle volant selon les conditions avec (a) mise à jour de modèle interne du système volant seulement, (b) modulation d'impédance apparente seulement et enfin (c) combinaison des deux stratégies d'adaptation.

Enfin, nous présentons à la figure 10.20 à la fois l'évolution du couple d'impédance (courbes $(1-a)$ $(1-b)$ et $(1-c)$) et de poursuite (courbes $(2-a)$ $(2-b)$ et $(2-c)$) du conducteur selon les conditions citées auparavant. Lorsque aucune mise à jour de modèle interne n'est effectuée, le couple d'impédance prend en charge en partie et de manière permanente l'inadéquation du couple de poursuite due à un modèle interne inadapté. Nous observons par ailleurs que le couple de poursuite dans une telle condition augmente malgré tout après l'occurrence de l'événement et, comme nous l'avons vu précédemment, la consigne d'angle volant est modifiée de sorte que le couple résultant compense en partie les effets de la perturbation de couple (courbe $(2-b)$). Lorsque la mise à jour du modèle interne est effective, le couple d'impédance n'intervient plus que provisoirement, le temps que l'apprentissage du nouveau contexte soit achevé.

Au final, nous nous apercevons que les résultats observés expérimentalement peuvent être expliqués par l'une ou l'autre des deux stratégies d'adaptation étudiées ou même par la combinaison des deux. Toutefois, le contexte de cette expérimentation ainsi que les méthodes de mesure employées ne fournissent que peu d'indices pour discriminer l'une ou l'autre de ces stratégies. Afin d'apporter d'autres éléments, il serait pertinent de mesurer le niveau de contraction musculaire des sujets au cours de la conduite et de le confronter à une diminution soudaine du couple volant (retour à la condition nominale) pour détecter ou

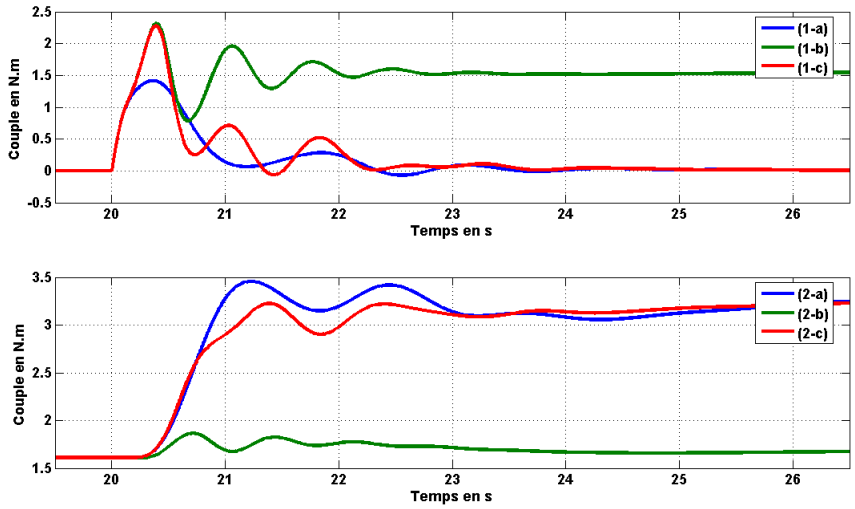


FIGURE 10.20 – La figure du dessus représente l'évolution de couple d'impédance du conducteur selon les conditions $(1-a)$ de mise à jour seule du modèle interne, $(1-b)$ de modulation d'impédance seule et enfin $(1-c)$ de combinaison des deux stratégies. La figure en dessous décrit quant à elle l'évolution du couple de poursuite selon les mêmes conditions.

non un $after-effect$, caractéristique de l'apprentissage du nouveau contexte. Enfin, nous pouvons nous interroger sur la variabilité inter-sujet à propos de la stratégie employée : il n'est en effet pas évident que tous les conducteurs aient recours à la même stratégie d'adaptation. Certains pourront ou non mettre à jour leur modèle du système volant, voire modifier leur représentation de la dynamique latérale du véhicule. L'intérêt du modèle étant alors de permettre de quantifier, pour les différentes stratégies adaptatives dont il est doté, celles qui seront par exemple en mesure de faire face aux événements étudiés et celles conduisant à un éventuel accident, sortie de voie...

10.4 Conclusion

Nous avons lors de ce chapitre présenté deux expérimentations similaires, mettant en lumière les capacités adaptatives du système sensorimoteur. Nous avons en particulier remarqué que la quantification de ces capacités par les métriques classiques était limitée. Bien que ces critères démontrent une adaptation globale, ils ne permettent pas de comprendre les processus qui en sont à l'origine. Des éléments de compréhension peuvent alors être apportés par des analyses subjectives et compléter ainsi l'évaluation des conséquences sur un conducteur d'un changement de contexte soudain et imprévu. Pour la se-

conde expérimentation, les résultats obtenus concernant les critères objectifs de conduite étaient prévisibles à la fois par les essais réalisés au cours du chapitre 9 mais aussi par les prédictions du modèle avec les jeux de paramètres qui en découlèrent. Toutefois, la présente expérimentation met en lumière la robustesse de la stratégie de contrôle et d'apprentissage des conducteurs dans une situation écologiquement plus proche du contexte de la conduite automobile mais également lorsque ces derniers se voient confier d'autres tâches à réaliser (notons que les groupes de sujets pour ces deux expérimentations étaient différents). Nous avons par ailleurs montré un exemple d'utilisation des outils de modélisation pour une plus fine compréhension des observations expérimentales. Leur mise au point ainsi que leur calibration peuvent se révéler délicates de par le manque de connaissances ou l'impossibilité de dissocier, d'isoler un élément de son ensemble. Toutefois, ces outils offrent des possibilités de test de différentes hypothèses et de prédictions pour des études de facteurs humains. Nous nous proposons au chapitre 11 de détailler certaines de ces applications.

Chapitre 11

Perspectives et conclusion générale

Sommaire

11.1 Perspectives 176

11.1.1 Evolutions du modèle 176

11.1.2 Sûreté de fonctionnement 179

11.2 Conclusion générale 182

11.1 Perspectives

11.1.1 Evolutions du modèle

Modulation d'impédance

Certaines propositions d'évolution du mécanisme de modulation d'impédance ont déjà été identifiées au cours du chapitre 8, en particulier la gestion de la diminution de l'impédance apparente durant l'éventuelle mise à jour des modèles internes utilisés dans la loi de contrôle. Nous évoquons alors deux pistes supplémentaires d'étude. La première concerne le signal d'excitation sur lequel se base le mécanisme de modulation. Dans le modèle que nous avons proposé, celui-ci n'est autre que l'erreur entre une position angulaire désirée (calculée lors de la phase d'anticipation/prédiction) et celle réellement atteinte par le volant. Les différentes simulations ont permis d'observer que ce signal d'erreur s'annule dès lors que, suite à une modification du comportement du volant, l'internalisation de ce changement (apprentissage) est achevée. Or le mécanisme d'apprentissage n'est autre qu'un observateur de la dynamique du volant. Ainsi, nous pourrions imaginer la modulation d'impédance plus directement dépendante de la prédiction que ce modèle interne réalise de la position courante du volant. Une seconde piste concerne la dynamique même de modulation ou plutôt la manière dont le signal d'excitation est utilisé. La figure 11.1 représente une simulation de l'évolution de la raideur apparente du conducteur suite à une augmentation soudaine du couple volant avec apprentissage de ce nouveau contexte (voir chapitre 10). De par la loi de modulation choisie, la vitesse d'évolution de la raideur apparente est d'autant plus élevée que le niveau d'erreur est important (proportionnelle au carré de cette erreur). Ainsi, lorsque le conducteur parvient à atteindre la position qu'il désire pour le volant, sa modulation d'impédance apparente diminue. Cependant il serait nécessaire de s'assurer d'un tel comportement. En particulier, il est tout à fait envisageable que par souci sécuritaire, l'impédance ne présente pas ce ralentissement voire même continue d'augmenter alors que le niveau d'erreur n'est plus excitant. Ceci devient critique si nous envisageons d'étudier par exemple des variations de couple en forme de créneau : la réponse du conducteur à une chute soudaine de couple dépendra de l'état de raideur et de viscosité apparentes atteintes lors de l'augmentation soudaine de couple la précédant.

Apprentissage

Comme nous l'avons vu précédemment, la détermination des caractéristiques quantitatives des mécanismes d'internalisation se révèle être une tâche complexe. S'il est possible de mesurer en ligne le niveau de contraction musculaire de sujets et donc de disposer d'éléments relatifs à son impédance appa-

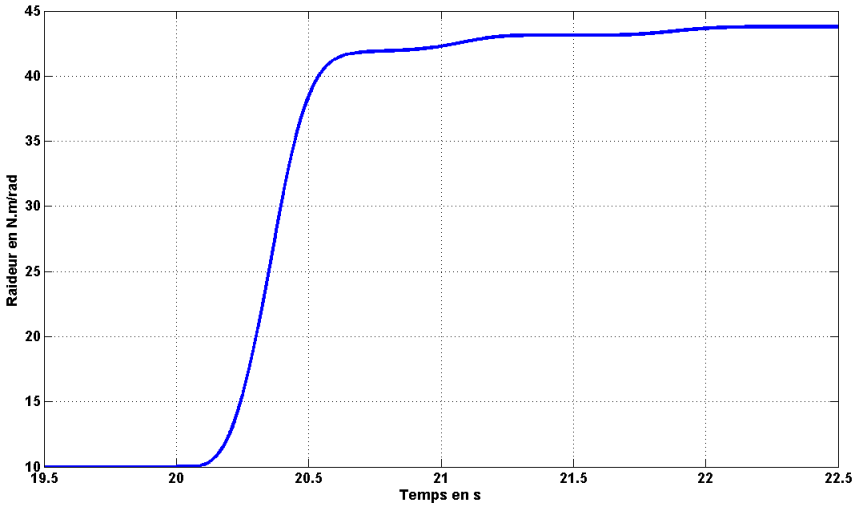


FIGURE 11.1 – Simulation de l'évolution de la raideur apparente du conducteur suite à une augmentation soudaine du couple volant. La vitesse de modulation est d'autant plus importante que le niveau d'erreur entre les états désiré et réel du volant est élevé.

rente, il n'en est pas de même pour évaluer l'adéquation d'un modèle interne avec le système qu'il est sensé représenté. L'observation de l'apprentissage d'un phénomène donné nécessite généralement des dispositifs expérimentaux incompatibles, selon notre contexte, avec la réalisation d'une tâche de conduite. Par ailleurs, nous avons posé dans notre approche d'importantes hypothèses relatives à la structure du modèle interne pris en compte ainsi qu'à la manière dont les paramètres de celui-ci étaient mis à jour. Nous identifions alors deux contextes d'utilisation selon que, suite à une modification du système contrôlé, la convergence des mécanismes d'apprentissage est connue ou non.

Dans le cas où des études préalables auraient démontré la faisabilité pour un sujet d'internaliser des changements de comportement d'un système (et dont la dynamique serait alors connue, au moins en termes de vitesse), le mécanisme d'apprentissage proposé ne présenterait que peu d'intérêt et ce pour différentes raisons. Tout d'abord, il est plus commode et plus contrôlable (convergence de l'algorithme de mise à jour) pour le modélisateur de proposer une dynamique de transition entre deux états stables (et connus au préalable) d'un paramètre du modèle interne. Ainsi, il est possible de ne caractériser un modèle de transition qu'au travers d'un unique paramètre décrivant simplement la durée de cet état transitoire. De ce fait, dans le cas particulier de durées d'apprentissage très courtes, le modélisateur se soustrait à d'éventuelles difficultés liées à des instabilités de la loi de mise à jour des paramètres du modèle interne. En effet,

nous avons vu par exemple au chapitre 8 que la loi MIT utilisée dans le modèle présentait des instabilités au niveau de la mise à jour de la raideur apparente du système volant lorsque celle-ci était contrainte à disparaître rapidement. Plaçons-nous par exemple dans le contexte de l'expérimentation décrite dans la seconde partie du chapitre 10. La figure 11.2 représente alors la simulation de l'estimation du gain rapporté à la raideur du volant. Nous y observons clairement ce phénomène oscillatoire transitoire. Un tel phénomène peut affecter la tâche de conduite de manière involontaire pour le modélisateur qui ne saura quelle attention donner au comportement transitoire de l'apprentissage.

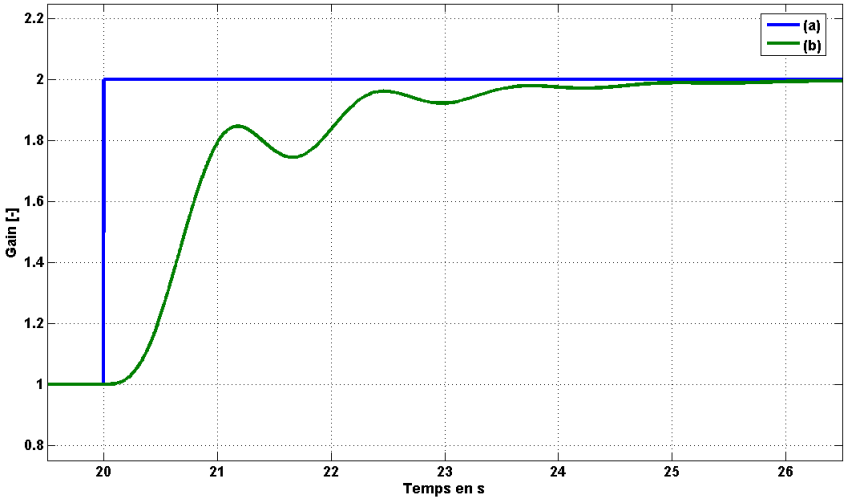


FIGURE 11.2 – Simulation de l'évolution (a) du gain appliqué à la raideur du système volant ainsi que de celle (b) de la représentation interne de gain pour le conducteur.

L'outil proposé ici n'a pas pour vocation de piloter de manière autonome un véhicule. Nous entendons par là que nous disposons de la connaissance des événements pouvant se produire : nous sommes donc à même de connaître vers quels états les paramètres des modèles internes doivent tendre. Bien qu'aucune information ne soit disponible sur un apprentissage a priori, il convient de tester différentes hypothèses sur celui-ci et ainsi de se retrouver dans le cas défini précédemment. Ceci est d'autant plus légitime que les lois de mise à jour proposées n'ont pas de représentativité dans la phase transitoire de l'apprentissage. Dès lors, nous identifions le recours à des lois de type MIT non pas pour leur capacité à atteindre de nouveaux états de paramètres mais sur la manière d'y arriver. Ainsi, il nous est possible d'identifier les signaux nécessaires à l'apprentissage et d'étudier la part des différentes modalités sensorielles impliquées dans l'extraction d'information. Nous voyons ici l'indéniable intérêt de

l'approche proposée pour l'apprentissage de modèles internes.

De plus, le modèle que nous proposons ne présente des capacités adaptatives qu'au niveau sensorimoteur. Nous entendons par là que l'étape d'anticipation/prédiction intègre une représentation interne de la dynamique latérale du véhicule qui est cantonnée à un jeu de paramètres figés. Or, dans notre contexte d'étude, il serait intéressant d'évaluer l'éventualité de conflits d'apprentissage dans le sens où le conducteur pourrait internaliser la modification d'un paramètre du véhicule au niveau d'un autre de ces paramètres. Ceci est d'autant plus pertinent que certains véhicules actuels présentent un facteur de démultiplication (ratio entre l'angle volant et celui des roues) variable : quel sera l'impact sur la sécurité d'un conducteur s'il interprète une modification du facteur de démultiplication comme une variation de raideur du volant de son véhicule ? L'arrivée dans un avenir proche de systèmes à commande découplée SBW ($Steer-By-Wire$) autorisera une totale liberté dans les stratégies de retour d'effort au volant et de modulation de facteur de démultiplication.

11.1.2 Sûreté de fonctionnement

Notre approche nous autorise à n'étudier non seulement les réactions du conducteur mais aussi le comportement global de l'ensemble qu'il forme avec le véhicule. La notion de sûreté de fonctionnement (SDF) apparaît dès le début du 20^{eme} siècle avec le développement du transport ferroviaire et de la distribution d'énergie électrique. Plus tard, l'essor du transport aérien conduira les avionneurs à développer des méthodes d'évaluation de la sécurité des aéronefs. Aujourd'hui, les études de SDF sont intégrées à de nombreux domaines d'applications afin d'éviter au maximum les incidents liés à l'activité industrielle et humaine. Elle repose entre autres sur les notions (Zwingelstein, 1999) de fiabilité (probabilité de non-défaillance d'un équipement), de disponibilité (probabilité à un instant t d'un système de réaliser sa fonction) et de maintenabilité (aptitude d'un système à être maintenu en état). Une étude de SDF d'un dispositif comporte principalement (voir figure 11.3) :

- Une analyse organique et fonctionnelle.
- Une analyse quantitative.
- Une analyse qualitative.

L'analyse organique et fonctionnelle repose sur une décomposition du système étudié afin d'identifier au mieux les défaillances (et leurs conséquences) des composants et de leurs fonctions. Le cahier des charges fonctionnel (CdCF) est un document essentiel à ce type d'analyse. Nous y retrouvons par exemple les méthodes FAST (Function Analysis System Technique) et SADT (Structure Analysis Design Technique).

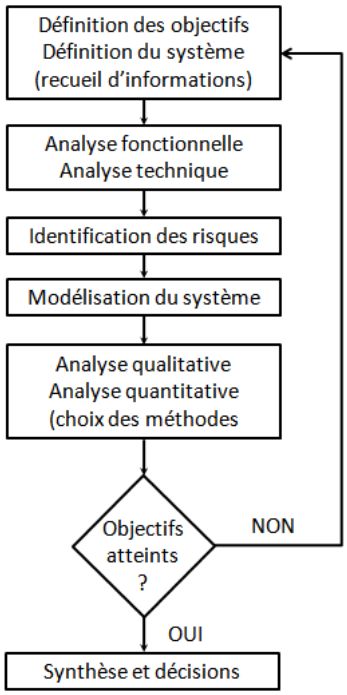


FIGURE 11.3 – Proposition d'organigramme global des différentes étapes d'une analyse de sûreté de fonctionnement proposée par Zwingelstein, 1999.

Les études de sûreté de fonctionnement des systèmes intègrent généralement une analyse prévisionnelle des risques. Il s'agit d'étudier les dysfonctionnements auxquels un système ou l'un de ses composants peut être sujet en se concentrant aussi bien sur les causes, le contexte y conduisant ainsi que sur les conséquences qui en découlent. Cette démarche requiert une connaissance fine du système en question dont la description est tant organique que fonctionnelle. Par ailleurs, il serait pernicieux pour une telle analyse de négliger les interactions entre ce système et l'environnement dans lequel il évolue. Deux catégories d'approches d'analyse prévisionnelle se distinguent. L'approche dite inductive a pour objectif d'étudier les conséquences des phénomènes à l'origine de la défaillance du système ou de l'un de ses composants. Selon l'approche inductive, le cheminement inverse est appliqué en identifiant la ou les raisons étant ou pouvant être à l'origine du dysfonctionnement (Zwingelstein, 1999, Aubry et Chatelet, 2008, Giraud, 2006).

Développée à l'origine pour l'industrie aéronautique, la méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) est une technique d'ana-

lyse prévisionnelle inductive largement utilisée en milieu industriel (nucléaire, transport). Le recours à une telle méthode requiert l'établissement d'une description du système en sous-ensembles dont la caractérisation des modes de défaillances est connue. Une fois la recherche la plus exhaustive qui soit des modes de défaillances et de leurs causes immédiates achevée, l'évaluation des conséquences sur le système conduit à des actions correctives puis à une nouvelle itération de l'analyse (re-bouclage). La méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) confère à la méthode AMDE la notion de criticité des défaillances. Cette méthode fut mise au point pour le projet spatial Apollo lors de la conception du LEM (*Lunar Excursion Module*). La criticité d'un risque, d'un dysfonctionnement rend compte à la fois de la gravité des conséquences engendrées ainsi que de sa probabilité d'occurrence. Il est alors aisé de visualiser, au moyen d'une matrice de criticité (voir tableau 11.4), les zones d'acceptabilité et de refus du risque (dans une optique d'aide à la décision par exemple). Les méthodes AMDE et AMDEC présentent en particulier l'avantage de bénéficier d'un important retour d'expérience (depuis les années 60) et de faire l'objet de normes.

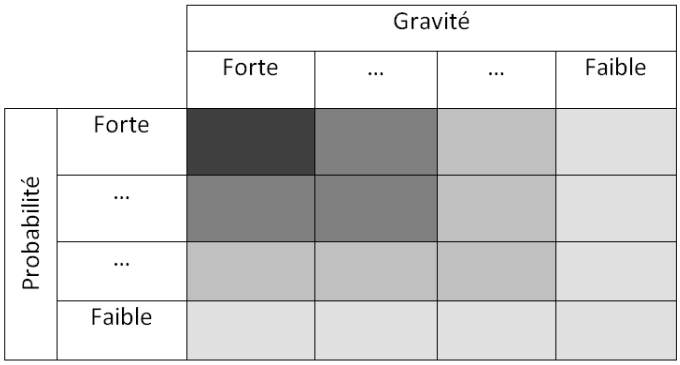


FIGURE 11.4 – Exemple de matrice de criticité. La combinaison de la gravité d'un événement et de sa probabilité d'occurrence permettent aux concepteurs de visualiser aisément la criticité associée et donc de faciliter la prise de décision.

En disposant de modèles de comportement quantitatif tel que celui présenté au cours de cette étude, il est alors possible d'établir ces matrices de criticité dès les phases amont de conception des véhicules en évaluant l'impact de certains modes dégradés et selon différentes métriques. La figure 11.5 représente les variations maximales de position angulaire du volant suite à une perte d'assistance soudaine. Il est à noter que la confrontation expérimentale ne peut être écartée de telles études.

Enfin, le modèle adaptatif de conducteur offre une large palette de critères pour quantifier et comparer les effets de différents modes dégradés non pas sur le véhicule ou système considéré seule mais au niveau de l'interaction entre le véhicule et le conducteur. Que se soit en termes de variation de position du véhicule sur la voie ou de durée d'apprentissage du nouveau contexte, il est dorénavant possible de catégoriser au travers d'une métrique commune les effets de différents types d'évènements sur la performance des conducteurs.

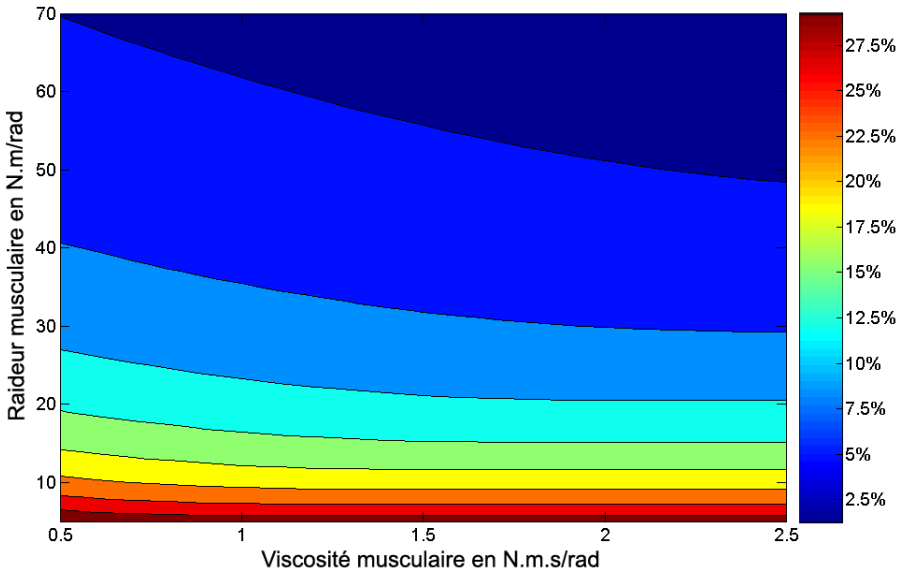


FIGURE 11.5 – Effet d'une augmentation soudaine et permanente de la raideur du système volant pour différents couples de raideur et viscosité musculaires. La variation relative maximale de l'angle volant diminue avec l'augmentation de la raideur et de la viscosité musculaires du conducteur. La connaissance de ces valeurs permet une première estimation des conséquences de la défaillance sur la tâche de conduite et donc sur la sécurité de l'automobiliste.

11.2 Conclusion générale

Au cours de cette étude, nous avons pu appréhender diverses disciplines afin de les faire converger vers un objectif commun. Nous avons alors proposé un cadre de travail à notre problématique ainsi qu'un modèle autorisant l'étude de la plasticité du contrôle du conducteur. Compte tenu de la complexité de l'être humain, nous avons opté pour une approche fonctionnelle en nous efforçant toutefois de conserver une cohérence physiologique. Bien que le modèle proposé n'intègre pas de manière exhaustive l'intégralité des réactions possibles des conducteurs, il autorise au travers d'hypothèses simples l'apport de nou-

velles connaissances sur la manière dont ceux-ci réagissent.

Nous avons pu au cours des différentes expérimentations réalisées observer l'extraordinaire capacité de l'être humain à faire face à des changements de son environnement, avec rapidité et efficacité, et ce même dans des situations critiques. Les outils de simulation développés par le Centre technique de Simulation de RENAULT se sont alors révéler être de puissants atouts pour notre étude, offrant une grande liberté de choix dans le type d'expérimentations mises en œuvre. Toutefois, la pertinence des résultats qu'ils produisent est encore peu connue pour les études de sûreté de fonctionnement où les sujets se retrouvent virtuellement dans des situations potentiellement dangereuses. La question d'immersion en environnement virtuel pour ce type d'études est un domaine qu'il convient encore d'explorer.

Bibliographie

Allen, R. et Chrstos, J. 2002. Driver/vehicle modeling and simulation. *SAE Paper 2002-01-1568*, 1568.

Aron, M. 1988. Car-following in an urban network : simulation and experiments. In *16th PTRC Meeting*, pages 29–39.

Aubry, J. et Chatelet, E. 2008. Sûreté de fonctionnement des systèmes de commande - principes et méthodes. *Techniques de l'Ingénieur*, (S8262).

Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A., et Sugiyama, Y. 1995. A dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. *Physics review*, 51(Part E) :1035–1042.

Bayliss, M. 2005. A simplified vehicle and driver model for vehicle systems development. *Driving Simulation Conference - North America*, pages 10–20.

Bennett, D. 1994. Nonlinear identification of stretch reflex dynamics. *J. Physiol.*, 15(2) :339–351.

Bhat, S. 2007. Model reference adaptive control - cours.

Bhushan, N. et Shadmehr, R. 1999. Computational nature of human adaptive control during learning of reaching movements in force fields. *Biological Cybernetics*, 81 :39–60.

Biral, M. et Li, D. 2001. Modelling drivers with the optimal manoeuvre method. *7th International Conference and Exhibition*.

Bizzi, E., Chapple, W., et Hogan, N. 1982. Mechanical properties of muscles : Implication for motor control. *Trends In Neuroscience*, 5 :395–398.

Blouin, J. 2004. *Mécanismes de stabilisation de la tête sur le tronc en posture assise. Contribution réflexe, cognitive et adaptabilité de ces mécanismes*. PhD thesis, Doctorat en kinésiologie, Médecine sociale et préventive Division de kinésiologie,Université Laval.

Boer, E. 2000a. Behavioral entropy as an index of workload.

Boer, E. 2005a. Driver performance assessment with a car following model. In *Proceedings of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*.

Boer, E. 2005b. Steering entropy revisited. *PROCEEDINGS of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment*.

Boer, E. 2006. Driving simulator validation : Car following gap controllability. In *Driving Simulation Conference Asia*.

Boer, E. R. 2000b. Behavioral entropy as a measure of driving performance.

Bonnet, C. 2006-2007. Psycologie cognitive, ue panorama de la psychologie. *Université Louis Pasteur, Faculté de Psychologie et des Sciences de l Education*.

Chandler, R., Herman, R., et Montroll, E. 1958. Traffic dynamics : studies in car following. *Operational Research*, 6 :164–184.

Chen, L. et Ulsoy, A. 2006. Experimental evaluation of a vehicule steering assist controller using a driving simulator. *Vehicle system dynamics*, 44(3).

Cheze, L. 2005. Modèle mécanique du muscle squelettique. Cours à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Section de Génie Mécanique. LBMH : Laboratoire de Biomécanique et Modélisation Humaine.

Chiu-Geng, L. 1995. Lane sensing and path prediction for preventing road departure accidents.

Cole, D., Pick, A., et Odhams, A. 2006. Predictive and linear quadratic methods for potential application to modelling driver steering control. *Vehicle System Dynamics*, 44(3) :259–284.

Combe, E., Posselt, J., et Kemeny, A. 2008a. 1 :1 scale perception in virtual and augmented reality. In *18th International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pages 152–160, Yokohama, Japan.

Combe, E., Posselt, J., et Kemeny, A. 2008b. Virtual prototype visualization : a size perception study. In *NordiCHI '08 : Proceedings of the 5th Nordic conference on Human-computer interaction*, pages 581–582, New York, NY, USA. ACM.

Cometti, G. 2008. Les mécanismes de la force.

Dagdelen, M., Berlioux, J., Panerai, F., Reymond, G., et Kemeny, A. 2006. Validation process of the ultimate high-performance driving simulator. *DSC 2006 Europe*, pages 37–48.

de Wit, C., Siciliano, B., et Bastin, G. 1996. The zodiac, theory of robot control. *Springer Verlag*.

Deborne, R., barthou, A., Toffin, D., Reymond, G., et Kemeny, A. 2008. Simulation study of driver stress and performance to an unexpected steering critical event. *DSC Europe*, pages 111–120.

Denis, F. 2008. Cours de traitement d'images, université lyon i.

Didier, J. 2004. *La plasticité de la fonction motrice*. Collection de L Académie Européenne de Médecine de Réadaptation. Springer.

Dingwell, J., Mah, C., et Mussa-Ivaldi, F. 2002. Manipulating objects with internal degrees of freedom : Evidence for model-based control. *Journal of Neurophysiology*, 88 :222–235.

Doemges, F. et Rack, P. 1992. Task-dependent changes in the response of human wrist joints to mechanical disturbance. *J Physiol*, 447(1) :575–585.

Donchin, O. et Shadmehr, R. 2004. Change of desired trajectory caused by training in a novel motor task. In *Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS*.

Elkind, J., Kelly, J., et Payne, R. 1964. Adaptive characteristics of the human operator in systems having complex dynamics. *5th National Symposium Human Factors in Electronics*, pages 143–159.

E.M. Rantanen, J. G. 1999. The effect of mental workload on the visual field size and shape. *Ergonomics*, 6 :816–834.

Evans, K. et Treisman, A. 2005. Perception of objects in natural scenes : Is it really attention free ? *Journal of Experimental Psychology ; Human Perception and Performance*, 31(6) :1476–1492.

Feldman, A. 1966. Function tuning of the nervous system during control of movement or maintenance of a steady posture - 3 mechanographic analysis of the execution by man of the simplest motor task. *Biofizika*, 11(4) :667–675.

Fernandez-Ruiz, J. et Diaz, R. 1999. Prism adaptation and aftereffect : Specifying the properties of a procedural memory system. *Learn. Mem.*, 6(1) :47–53.

Filliard, N., Reymond, G., et Kemeny, A. 2009a. Parallax rendering in immersive cylindrical displays. *ACM Transactions on Applied Perception*.

Filliard, N., Reymond, G., Wertheim, A., Kemeny, A., et Berthoz, A. 2008. Vestibular stimulation causes underestimation of visual velocity. *Perception 37 ECPV Abstract Supplement*, page 113.

Filliard, N., Vailleau, B., Reymond, G., et Kemeny, A. 2009b. Combined scale factors for lateral and yaw motion rendering. *DSC Europe*, pages 161–172.

Fitts, P. 1954. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Experimental Psychology*, 47(6) :381–391.

Flanagan, J. et Wing, A. 1997. The role of internal models in motion planning and control : evidence from grip force adjustments during movements of hand-held loads. *J. Neurosci.*, 17 :1519–1528.

Flash, T. et Gurevich, I. 1991. Arm stiffness and movement adaptation to external loads. *Neuromuscular Systems*, 25(5-2) :0885–0886.

Flash, T. et Hogan, N. 1985. The coordination of arm movements : An experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience*, 5(7) :1688–1703.

Franklin, D., So, U., Bourdet, E., et Kawato, M. 2007. Visual feedback is not necesary for learning of novel dynamics. *Plos One*, 2(12) :1–14.

Gazis, D., Herman, R., et Potts, R. 1959. Car following theory of steady state traffic flow. *Operations Research*, 7(4) :499–505.

Gielen, C. et Houk, J. 1987. A model of the motor servo : Incorporating nonlinear spindle receptor and muscle mechanical properties. *Biol. Cybern.*, 57 :217–231.

Gipps, P. 1981. A behavorial car following model for computer simulation. *Transportation Research*, B15 :105–111.

Girard, A. 2008. Stabilité des systèmes dynamiques. *Cours de l ENSIMAG*.

Giraud, M. 2006. Sûreté de fonctionnement des systèmes - Étude expérimentale des lois de la fiabilité. *Techniques de l'Ingénieur*, (E3854).

Godthelp, H. 1986. Vehicle driving during curve control. *Human Factors*, 28(211) :221.

Godthelp, J. et Konings, H. 1981. Levels of steering control ; some notes on the. time-to-line crossing concept.

Gomi, H. et Kawato, M. 1996. Equilibrium-point control hypothesis examined by measured arm stiffness during mutlijoint movement. *Science*, 272 :117–120.

Gomi, H. et Kawato, M. 1997. Human arm stiffness and equilibrium-point trajectory during multi-joint movement. *Biological Cybernetics*, 76 :163–171.

Gomi, H. et Kawato, M. 1998. Temporal firing patterns of purkinje cells in the cerebellar ventral paraflocculus during ocular following responses in monkeys i. simple spikes. *J Neurophysiol*, 80 :818–831.

Gribble, P. et David, J. 1999. Compensation for interaction torques during single and multijoint limb movement. *J. Neurophysiol.*, 82 :2310–2326.

Gribble, P., Mullin, L., Cothros, N., et Mattar, A. 2003. Role of cocontraction in arm movement accuracy. *J. Neurophysiol.*, 89 :2396–2405.

Gribble, P. et Ostry, D. 1996. Origins of the power law relation between movement velocity and curvature : modeling the effects of muscle mechanics and limb dynamics. *J. Neurophysiol.*, 76(5) :2853–2860.

Guillaud, E. 2006. *Contribution vestibulaire au contrôle des mouvements du bras lors d'une rotation du corps*. PhD thesis, Université Laval et Dans le cadre d une cotutelle de thèse en collaboration avec l Université de la Méditerranée. Doctorat en kinésiologie.

Guo, K. et Guan, H. 1993. Modeling of driver/vehicle directional control system. *Vehicle System Dynamics*, 22 :141–184.

Hanken, A. et Rockwell, T. 1967. A model of car following derived empirically by piecewise regression analysis. *In pProceedings of the 3rd International Symposium on the Theory of Traffic Flow, New York : Elsevier*, pages 40–41.

Hanneton, S. 1999. Le contrôle de la dynamique des mouvements : Application à l'etude d'une tâche de poursuite visuo-manuelle.

Harris, C. et Wolpert, D. 1998. Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394 :780–784.

Hayoe, G. 1979. A driver model based on the cerebellar model articulation controller. *Vehicle System Dynamics*, 8 :49–72.

Held, R. 1965. Plasticity in sensory-motor systems. *Sci. Am.*, 213 :84–94.

Helly, W. 1959. Simulation of bottleneck in single lane traffic flow. *In Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow*, pages 207–238. Research Laboratories, General Motors, New York : Elsevier.

Henneman, E. et Olson, C. 1965. Relations between structure and function in the design of skeletal muscles. *Journal of Neurophysioly*, 28 :581–598.

Henneman, E., Somjen, G., et Carpenter, D. 1965a. Carpenter excitability and inhibitability of motoneurons of different sizes. *Journal of Neurophysioly*, 28 :599–620.

Henneman, E., Somjen, G., et Carpenter, D. 1965b. Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *Journal of Neurophysioly*, 28 :560–580.

Hill, A. 1938. The heat of shortening and the dynamics constants of muscle. In *Proceedings of the Royal Society of London*, volume B126, pages 136–195.

Hinder, E. M. M. 2006. Position information but not force information is used in adapting to changes in environmental dynamics. *J. Neurophysiol.*, 96(2) :526–534.

Hogan, N. 1984. Adaptive control of mechanical impedance by coactivation of antagonist muscles. *IEEE Transactionson Automatic Control*, 29 :681–690.

Hore, J., McCloskey, D., et Taylor, J. 1990. Task-dependent changes in gain of the reflex response to imperceptible perturbations of joint position in man. *J. Physiol.*, 429 :309–321.

Huxley, A. 1957. Muscle structure and theories of contraction. *Prog. Biophysics and Biophysical Chemistry*, 7 :255–318.

Iggo, A. et Andres, K. 1982. Morphology of cutaneous receptors. *Annual Review of Neuroscience*, 5 :1–31.

Ilchmann, A. et Ryan, E. 2008. High-gain control without identification : a survey. *GAMM-Mitteilungen*, 31(1) :115–125.

Ioannou, P. et Sung, J. 2003. *Robust Adaptive Control*. University of Southern California.

Jeanneau, J. 2002. Asservissement et régulation. *Cours de l Ecole Centrale de Nantes*, pages 10–37.

Jordan, M. 1995. Computational motor control. *The cognitive neurosciences*, In MS Gazzanniga (Eds.).

Jordan, M. et Rumelhart, D. 1992. Forward models : supervised learning with a distal teacher. *Cogn. Sci.*, 16 :307–354.

Kawato, M. 1999. Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9 :718–727.

Kawato, M., Furawaka, K., et Suzuki, R. 1987. A hierarchical neural network model for the control and learning of voluntary movements. *Biol. Cybern.*, 56 :1–17.

Kawato, M. et Gomi, H. 1993. A computational model of four regions of the cerebellum based on feedback-error learning. *Biological Cybernetics*, 68 :95–103.

Kearney, R. et Hunter, I. 1988. Nonlinear identification of stretch reflex dynamics. *Annals of Biomedical Engineering*, 16(1) :79–94.

Khalil, W. 2005. Commandes des robots. *Cours de l Ecole Centrale de Nantes*, pages 150–153.

Kircher, A., Uddman, M., et Sandin, J. 2002. Vehicule control and drowsiness.

Kometani, E. et Sasaki, T. 1959. Dynamic behavior of traffic with nonlinear spacing-speed relationship. In *Proceedings of Symposium on Theory of Traffic Flow*, pages 105–119. Research Laboratory, General Motors Corp, Elsevier Publishing Co.

Krauss, S. 1997. *Microscopic Modeling of Traffic Flow : Investigation of Collision Free Vehicle dynamics*. PhD thesis, University of Cologne, Germany.

Kuge, N., T.Yamamura, Shimoyama, O., et Liu, A. 2000. A driver behaviour recognition method based on a driver model framework. *SAE transactions*, 109(6) :469–476.

Kuo, A. 1995. An optimal-control model for analysing human postural balance. *IEEE trans. Biomed. Eng.*, 42 :87–101.

Kuo, A. 2005. An optimal state estimation model of sensory integration in human postural balance. *J. Neural Eng.*, 42 :235–249.

Lackner, J. et Dizio, P. 1994. Rapid adaptation to Coriolis force perturbations of arm trajectory. *J. Neurophysiol.*, 72(1) :299–313.

Lackner, J. et Dizio, P. 2000. New approaches to human-pilot/vehicle dynamics analysis. *trends in Cognitive Sciences*, 4(7) :279–288.

Lackner, J. et DiZio, P. 2005. Motor control and learning in altered dynamic environments. *Current Opinion in Neurobiology*, 15 :653–659.

Lacquaniti, F. et Maioli, C. 1989. Adaptation to suppression of visual information during catching. *Journal of Neuroscience*, 9 :149–159.

Lacquaniti, F., Terzuolo, C., et Viviani, P. 1983. The law relating kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54 :115–130.

Lacroix, B., Mathieu, P., et Kemeny, A. 2009a. The use of norms violations to model agents behavioral variety. *Coordination, Organizations, Institutions and Norms in Agent Systems IV.LNCS, vol. 5428, Springer, Heidelberg.*

Lacroix, B., Rouelle, V., Kemeny, A., Mathieu, P., Laurent, N., Millet, G., et Gallee, G. 2009b. Informal rules for autonomous vehicles in scaner. *DSC Europe*, pages 59–68.

Lee, K. et Peng, H. 2004. Identification and verification of a longitudinal human driving model for collision warning and avoidance systems. *Int. J. Vehicule Autonomous Systems*, 2.

Leutzbach, W. et Wiedemann, R. 1986. Development and application of traffic simulation models at karlsruhe institut fur verkehrwesen. *Traffic Engineering and Control*, pages 270–278.

Liu, J., Brown, R., et Yue, G. 2002. A dynamical model of muscle activation, fatigue, and recovery. *Biophysical Journal*, 82 :2344–2359.

MacAdam, C. 1980. An optimal control preview for linear systems. *Journal of Dynamics Systems*, 102 :188–190.

MacAdam, C. 2003. Understanding and modeling the human driver. *Vehicle System Dynamics*, 40 :101–134.

Magdaleno, R. et McRuer, D. 1971. Experimental validation and analytical elaboration for models of the pilots neuromuscular subsystem in tracking task. *NASA Contractor Report, NASA CR-1757*, 1757.

Malaterre, G. 1994. Méthode de mesure de la charge de travail en situation de conduite simulée et réelle.

Mars, F., Mestre, D., Durand, S., Vienne, F., et Espié, S. 2004. A visual aid for curve driving. *Driving Simulation Conference Europe*.

Matthews, G. 2002. Towards a transactional ergonomics for driver stress and fatigue. *Theor. Issues in Ergon. Sci.*, 3(2) :195–211.

McAdam, C. 1981. Applications of an optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving. *IEEE Trans. Syst., Man Cybern.*, SMC-11 :393–399.

McGill 2008. Cours de l université mcgill, canada, http ://lecerveau.mcgill.ca.

McIntyre, J. et Bizzi, E. 1993. Servo hypotheses for the biological control of movement. *Journal of motor behavior*, 25 :193–202.

McIntyre, J., Mussa-Ivaldi, F., et Bizzi, E. 1996. The control of stable postures in multijoint arm. *Exp. Brain. res*, 110 :248–264.

McLean, J. et Hoffman, E. 1971. Analysis of driver s control movements. *Human factors*, 13(5) :407–418.

McLean, J. et Hoffman, E. 1975. Steering reversals as a measure of driver performance and steering task difficulty.

McRuer, D. 1980. Human dynamics in man-machine systems. *Automatica*, 16 :237–253.

McRuer, D., Hofmann, L., Jex, H., Moore, G., et Phatak, A. 1968a. New approaches to human-pilot/vehicle dynamics analysis. *Technical report AFFDL-TR-67-150*.

McRuer, D. et Krendel, E. 1962. The man-machine concept. *Proceedings of the IRE*, 50 :1117–1123.

McRuer, D. et Krendel, E. 1974. Mathematical models of human pilot behavior. *Agardograph*, 188.

McRuer, D., Magdaleno, R., et Moore, G. 1967. A neuromuscular actuation system model. *USC-NASA Conference On Manual Control*.

McRuer, D., Magdaleno, R., et Moore, G. 1968b. A neuromuscular actuation system model. *IEEE Transactions On Man-Machine Systems*, 9(3) :61–70.

Mehta, B. et Schaal, S. 2002. Forward models in visuomotor control. *J. Neurophysiol.*, 88(2) :942–953.

Merfeld, D., Zupan, L., et Peterka, R. 2005. Humans use internal models to estimate gravity and linear acceleration. *Nature*, 398 :615–618.

Merton, P. 1953. Speculation on the servo-control of movement. *The spinal cord ; CibaFoundation Symposium*, pages 247–260.

Merton, P. 1972. How we control the contraction of our muscles. *Scientific American*, 226 :30–37.

Miall, R. 1996. Task-dependent changes in visual feedback control : A frequency analysis of human manual tracking. *J Mot Behav.*, 28(2) :125–135.

Miall, R., Weir, D., Wolpert, D., et Stein, J. 1993. Is the cerebellum a smith predictor ? *Journal of Motor Behavior*, 25(3) :203–216.

Miall, R. et Wolpert, D. 1996. Forward models for physiological motor control. *Neural Netw.*, 9(8) :1265–1279.

Michon, J. 1985. A critical view of driver behaviour models : What do we know, what should we do ? *Human Behaviour and Traffic Safety*.

Miller, D. et Elkind, J. 1967. The adaptive response of the human controller to sudden changes in controlled process dynamics. *IEEE Transactions On Human factors In Electronics*, 8(3) :218–223.

Milner, T. et franklin, D. 2005. Impedance controland internal model use during the initial stage of adaptation to novel dynamics un humans. *J. Physiol.*, 572(2) :651–664.

Mussa-Ivaldi, F., Hogan, N., et Bizzi, E. 1985. Neural, mechanical, and geometric factors subserving arm posture in humans. *The Journal of Neuroscience*, 5(10) :2732–2743.

NASA 1971. Experience with the x-15 adaptive flight control system, staff of the flight research center. Technical report, NASA.

Neboît, M. 1974. Perception, anticipation et conduite automobile. *Le Travail Humain*, 37 :52–72.

Nemoto, H., Yanagishima, T., et Taguchi, M. 2002. Driving workload comparison between older and younger drivers using the steering entropy method.

Newell, G. 2002. A simplified car following theory : A lower order model. *Transportation Research*, 36(Part B) :195–205.

Paassen, R. 1995. A model of the arm s neuromuscular system for manual control. *Proc. IFAC Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems*, 2000-01-0349.

Paillé, D. 2005. *Influence de la taille du champ de vision sur la perception des distances en environnement virtuel*. PhD thesis, Doctorat en Sciences Cognitives, Université Paris VI.

Panwai, S. et Dia, H. 2004. Development and evaluation of a reactive agent-based car following model. ITS Research Laboratory, Department of Civil Engineering, The University Of Queensland, Brisbane, Australia.

Peng, H. et Tomizuka, M. 1991. Optimal preview control for vehicle lateral guidance. *PATH Research Report*, UCB-ITS-PRR-91-16(Part E) :1–26.

Peng, H. et Ulsoy, A. 1997. *Driver Modeling - Lecture Notes*. Vehicle Control Systems.

Peters, B. 2000. System for effective assessment of driver vigilance and warning according to traffic risk estimation. projet awake - ist-2000-28062.

Piasco, J. 2003. Automatique fréquentielle. *Cours de l Ecole Centrale de Nantes*, pages 49–68.

Pick, A. et Cole, D. 2003. Neuromuscular dynamics and the vehicle steering task. In *Special issue of Vehicle System Dynamics*, Kanagawa Institute, Atsugi, Kanagawa, Japan. 18th IAVSD Symposium.

Pick, A. et Cole, D. 2004. Neuromuscular dynamics in the vehicle driving task. *Vehicle System Dynamics Supplement*, 4 :182–191.

Pick, A. et Cole, D. 2005. Neuromuscular dynamics in the driver-vehicle system. *Vehicle System Dynamics - Iavsd 2005*.

Pick, A. et Cole, D. 2006a. Dynamics properties of a driver s arms holding a steering wheel. *Personal Notes*.

Pick, A. et Cole, D. 2006b. Neuromuscular dynamics in the driver-vehicle system. *Vehicle System Dynamics*, 44 :624–631.

Pick, A. et Cole, D. 2007. Dynamic properties of a driver's arms holding a steering wheel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D : Journal of Automobile Engineering*, 221(12) :1475–1486.

Pick, A. et Cole, D. 2008. A mathematical model of driver steering control including neuromuscular dynamics. *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, 130(3).

Polderman, J. et Mareels, I. 2004. Two scale high gain adaptive control. *Int. J. Adaptive Control Signal Process*, 18 :393–402.

Polit, A. et Bizzi, E. 1979. Characteristics of motor programs underlying arm movements in monkey. *Journal of neurophysiology*, 33 :183–194.

Pouliquen, M. 2006. *Proposition d un modèle de la main pour le simulation des intéractions Homme-Machine en environnement virtuel. Application à la prévention des risques d accidents aux mains*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes.

Poulton, E. 1952. Perceptual anticipation in tracking with two-pointer and one-pointer displays.

Ranjitkar, P., Nakatsuji, T., et Kawamua, A. 2005. Car following models : An experiment based benchmarking. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6 :1582–1596.

Rigal, R. 2002. *Motricité Humaine, Fondements et Applications Pédagogiques, Tome 1 : Neurophysiologie Perceptivomotrice*. Presse de l'Université du Québec.

Rouanet, H. et Roux, B. L. 1995. Statistique en sciences humaines. *Editions DUNOD*.

Schaal, S. 1999. Adaptive control.

Sevcik, K. 2008. Model reference adaptive control : Survey of control systems - tutorial.

Shadmehr, R. et Mussa-Ivaldi, F. 1994. Adaptative representation of dynamics during learning of a motor task. *The Journal of Neuroscience*, 74(5) :3208–3224.

Sharp, R., Casanova, D., et Symonds, P. 2000. A mathematical model for driver steering control, with design, tuning and performance control. *Vehicle System Dynamics*, 33 :289–326.

Sharp, R. et Valtetsiotis, V. 2001. Optimal preview car steering control. *Vehicle System Dynamics*, 35 :101–117.

Shidara, M., Kawano, K., Gomi, H., et Kawato, M. 1993. Inverse-dynamics model eye movement control by purkinje cells in the cerebellum. *Nature*, 365 :50–52.

Slotine, J. et Li, W. 1991. Applied nonlinear control. *Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.*

Smith, M., Ghazizadeh, A., et Shadmehr, R. 2006. Interacting adaptive processes with different timescales underlie short-term motor learning. *PLoS Biology*, 4(6) :1035–1043.

Smith, O. 1959. A controller to overcome dead time. *IsA Journal*, 6 :28–33.

Östlund, J., Peters, B., Thorslund, B., Engström, J., Markkula, G., Keinath, A., Horst, D., Juch, S., Mattes, S., et Foehl, U. 2005. Driving performance assessment-methods and metrics. *Internal devilerable, IST-1-50-76-74-IP.*

Strandemar, K. et Thorvald, B. 2004. Driver perception sensitivity to changes in vehicle response. *Vehicle System Dynamics*, Supplement 41.

Takahashi, C., Scheidt, R., et Reinkensmeyer, D. 2001. Impedance Control and Internal Model Formation When Reaching in a Randomly Varying Dynamical Environment. *J. Neurophysiol.*, 86(2) :1047–1051.

Tees, K., Burdet, E., Chew, C., et Milner, T. 2004. A model of force and impedance in human arm movements. *Biological cybernetics*, 90(5) :368–375.

Teichner, W. 1954. Recent studies of simple reaction time. *Psycholo.*, 51.

Thoroughman, K. et Shadmehr, R. 1999. Electromyographic correlates of learning an internal model of reaching movements. *The Journal of Neuroscience*, 19(19) :pp. 8573–8588.

Thorpe, S., Gegenfurtner, K., Fabre-Thorpe, M., et Bülthoff, H. 2001. Detection of animals in natural images using far peripheral vision. *European Journal of Neuroscience*, 14 :869–876.

Tijerna, L. 1999. Preliminary assessment of algorithms for drowsy and inattentive driver detection on the road.

Tin, C. et Poon, C. 2005. Internal models in sensorimotor integration : perspectives from adaptive control theory. *Journal of Neural Engineering*, 2 :147–163.

Toffin, D., reymond, G., Kemeny, A., et Droulez, J. 2007. Role of steering wheel feedback on driver performance : driving simulator and modeling analysis. *Vehicle System Dynamics*, 45(4) :375–388.

Ungoren, A. et Peng, H. 2005. An adaptive lateral preview driver model. *Vehicle Systems Dynamics*, 43(4) :245–260.

Uno, Y., Kawato, M., et Suzuki, R. 1989. Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement : minimum torque change model. *Biological Cybernetics*, 61 :89–101.

Vanwinsum, W. et Godthelp, H. 1996. Speed choice and steering behaviour in curve driving.

Vercher, J., Sares, F., et Gauthier, G. 2003. *Role of sensory information in updating internal models of the effector during arm tracking*, volume 142, chapter 13, pages 203–222. Elsevier Progress in Brain Research.

Vieilledent, S., Kerlirzin, Y., Dalbera, S., et Berthoz, A. 2001. Relationship between velocity and curvature of a human locomotor trajectory. *Neuroscience Letters*, 305 :65–69.

Viviani, P. et Flash, T. 1995. Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony : Converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 21 :32–53.

Wang, T., Dordevic, G., et Shadmehr, R. 2001. Learning the dynamics of reaching movements results in the modification of arm impedance and long-latency perturbation responses. *Biol. Cybern.*, 85 :437–448.

Warren, W., Morris, M., et Kalish, M. 1988. Percetption of translation heading from optical flow. *Journal of experimental pshychology : Human Perception and Performance*, 14 :646–660.

Weir, D. et Chao, K. 2007. Modelling driver behaviour in automotive environments. *Springer*, pages 293–311.

Weir, D. et McRuer, D. 1968. A theory for driver steering control of motor vehicles. *47 th Annual Meeting of The Committee on Road User Characteristics*, pages 7–28.

Westman, M. 1990. The relationship between stress and performance : the moderating effect of hardiness. *Human performance*, 3(3) :141–155.

Wierwille, W. 1994. Research on vehicle-based driver status performance monitoring ; development, validation, and refinement of algorithms for detection of driver drowsiness.

Wierwille, W., Tijerina, L., Kiger, S., Rockwell, T., Lauber, E., et Jr, A. B. 1996. Heavy vehicle driver workload assessment. task 4 : Review of workload and related research.

Winter, D. 1990. Biomechanics and motor control of human movement. *Wiley, New York*.

Wolpert, D. et Ghahramani, Z. 2000. Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience Supplement*, 3 :1212–1217.

Wolpert, D., Ghahramani, Z., et Jordan, M. 1995. An internal model for sensorimotor integration. *Science, New Series*, 269(5232) :1880–1882.

Wolpert, D. et Kawato, M. 1998. Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Netw*, 11(7-8) :1317–1329.

Zwingelstein, G. 1999. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes. *Techniques de l'Ingénieur*, (S8250).

Troisième partie

Annexes

Annexe A

Stabilité des systèmes dynamiques

A.1 Stabilité de systèmes asservis

Soit le système asservi décrit par la figure A.1. La fonction de transfert d'un tel système en boucle fermée est donnée par la fonction de transfert $H(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)}$. Le dénominateur $1 + G(s)$ est appelé fonction caractéristique.



FIGURE A.1 – Schéma block d'un système G(s) en boucle fermée.

A.1.1 Définitions

Une condition nécessaire et suffisante à la stabilité de $H(s)$ est que les racines de l'équation caractéristique $1 + G(s)$ soient à partie réelle strictement négative (Jeanneau, 2002). On parle de stabilité au sens large lorsque cette équation possède également des racines simples à partie réelle nulle.

A.1.2 Méthodes

Nous présentons ici les méthodes classiques d'étude de la stabilité de systèmes asservis.

Calcul direct des racines

Une première méthode réside dans le calcul direct des racines de l'équation caractéristique. Toutefois, ceci peut se révéler fastidieux, voir impossible lorsque les paramètres de $G(s)$ sont en partie inconnus ou variables.

Critère de Routh

Le critère de Routh est une méthode algébrique pour déterminer le nombre de racines à partie réelle positive d'un polynôme.

Soit le polynôme de degré n décrit de la manière suivante : $P(s) = \sum_{i=0}^{n} b_i.s^i$. On forme alors le tableau suivant : Avec $A_{i,j} = A_{i-2,j+1} - \frac{A_{i-2,1}.A_{i-1,j+1}}{A_{i-1,1}}$. Le

b_n	b_{n-2}	...
b_{n-1}	b_{n-3}	...
...	$A_{i,j}$	...

TABLE A.1 – Critère de Routh

critère de Routh stipule que le nombre de changements de signes de la première colonne du tableau ci-dessus est égal au nombre de racines à partie réelle positive.

Critère du revers

Il s'agit d'un critère de stabilité dans le domaine fréquentiel. Il suppose que $G(s)$ est à minimum de phase et stable au sens large. Dans l'hypothèse où de telles conditions sont vérifiées, le système bouclé est alors stable si, en décrivant le lieu de Nyquist du transfert de boucle dans le sens des fréquences croissantes, le point critique (-1) est sur le coté gauche du parcours (Piasco, 2003). Ce critère est illustré par le figure A.2.

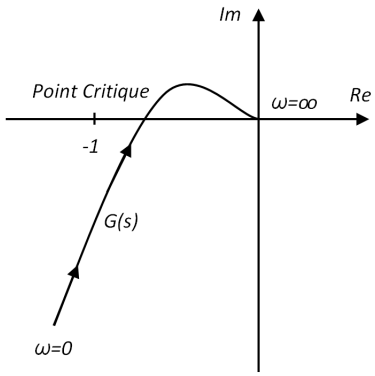


FIGURE A.2 – Illustration du critère du revers. Le système en boucle fermée est stable si en parcourant le lieu de transfert (dans le plan de Nyquist) du système en boucle ouverte dans le sens croissant des fréquences, le point critique -1 est laissé sur la gauche comme sur le schéma ci-dessus.

Critère de Nyquist
Le critère de Nyquist permet une analyse dans le domaine fréquentiel de la stabilité d'un système en boucle fermée à partir du lieu de transfert de sa boucle ouverte. L'objectif est alors de déterminer le nombre de racines de $1 + G(s)$ situées dans le demi plan droit, c'est-à-dire des racines à partie réelle positive. Pour ce faire, on définit un contour Γ du demi disque de rayon infini recouvrant le demi plan droit. En outre, on définit Γ' le contour fermé image de Γ par $G(s)$. Soit N le nombre de tours qu'effectue dans le sens trigonométrique le contour Γ' autour du point critique -1. Soit P le nombre de pôles de $1 + G(s)$ à l'intérieur de Γ et enfin Z le nombre de racines à partie réelle positive de $1 + G(s)$. Le système en boucle fermée est alors stable si et seulement si Z = 0 soit N = P.

A.2 Stabilité au sens de Lyapunov

Les résultats exposés ci-dessous proviennent en majorité des travaux de Khalil, 2005 et de Girard, 2008. Ils constituent un récapitulatif des travaux de Slotine et Li, 1991 et de de Wit et al., 1996 qui proposent d'étudier la stabilité des systèmes dynamiques au sens de Lyapunov par les fonctions du même nom. Nous nous placerons dans le cadre général des systèmes non linéaires et non autonomes (non temporellement invariants).

A.2.1 Définitions

Soit un système non linéaire et non temporellement invariant de vecteur d'état $X(t)$ décrit par la relation :

$$\frac{dX(t)}{dt} = f(X(t), t) \tag{A.1}$$

Stabilité

Le point d'équilibre $X = 0$ tel que f(X,0) = 0 $\forall$ t $\geq t_0$ est :
- stable à $t = t_0$ si $\forall \epsilon > 0$ $\exists$ $r(\epsilon, t_0) > 0$ tel que si $\|X(t_0)\| < \epsilon$ alors $\|X(t)\| < r$, $\forall$ t$\geq t_0$,
- asymptotiquement stable à $t = t_0$ s'il est stable et si $\exists$ $r(t_0) > 0$ tel que $\|X(t_0)\| < r(t_0) \Rightarrow lim_{t\to\infty}$ X(t) = 0,
- globalement asymtpotiquement stable s'il est stable et si $\forall$ $X(t_0)$, $lim_{t\to\infty}$ X(t) = 0,
- exponentiellement stable s'il existe deux réels positifs α et β tels que $\|X(t)\| \leq \alpha.e^{-\beta.(t-t_0)} \|X(t_0)\| \forall t \geq t_0$ pour $X(t_0)$ suffisament petit,
- uniformément stable si dans la définition de stabilité, $r = r(\epsilon)$ peut être choisi indépendamment de l'instant initial.

Fonctions de Lyapunov

Nous présentons ici certaines définitions nécessaires à la compréhension du théorème de Lyapunov.

Fonction de classe K

Une fonction continue $\alpha : \mathbf{R}^+ \rightarrow \mathbf{R}^+$ est de classe K si $\alpha(0) = 0, \forall\sigma\alpha(\sigma) > 0$ et avec α non décroissante.

Fonction définie positive

Une fonction V(X,t) est localement définie positive si et seulement si $\exists$ une fonction α de classe K de telle sorte que V(0,t) = 0 et $V(X,t) \geq \alpha(\|X\|)\forall t \geq 0$ et $\forall X$ inclus dans une boule B.

A.2.2 Théorème de stabilité

Soit une boule B centrée en X = 0. Nous supposons qu'il existe une fonction de Lyapunov V(X,t) dont les dérivées premières sont continues ainsi que les fonctions α, β et γ de classe K. Le point X = 0 est alors :

- stable si V(X,t) $\geq \alpha(\|X\|)$, $\frac{dV(X,t)}{dt} \leq 0$,
- uniformément stable si $\alpha(\|X\|) \leq V(X,t) \geq \beta(\|X\|)$, $\frac{dV(X,t)}{dt} \leq 0$,
- uniformément asymptotiquement stable si $\alpha(\|X\|) \leq V(X,t) \geq \beta(\|X\|)$, $\frac{dV(X,t)}{dt} \leq -\gamma(\|X\|) \leq 0$.

Il s'agit ici de la méthode directe de Lyapunov où l'objectif est finalement de trouver une fonction de Lyapunov, dite candidate, répondant aux critères présentés ci-dessus. Le point d'équilibre X = 0 représente généralement une mesure d'erreur entre un état (position, vitesse,...) désiré et réel. La convergence vers 0 signifie donc une annulation de cette erreur. Ce théorème ne permet pas de construire une fonction candidate mais apporte une condition suffisante de stabilité dans le sous-espace où celle-ci répond aux critères de fonction candidate.

A.2.3 Cas LTI

Plaçons nous cette fois dans le cas particulier d'un système dynamique linéaire temporellement invariant (système LTI). Soit le vecteur d'état X(t) $\in \mathbf{R}^n$ d'un tel système et A $\in \mathbf{R}^{nxn}$ la matrice décrivant son comportement, nous avons alors :

$$\frac{dX(t)}{dt} = A.X(t) \tag{A.2}$$

Un tel système est asymptotiquement stable si et seulement si pour toute matrice symétrique définie positive Q, il existe une matrice P définie positive vérifiant : $A^T.P + P.A = -Q$

Annexe B

Indicateurs de conduite

B.1 Introduction

Nous présentons ici un aperçu des principaux indicateurs permettant de décrire et de quantifier la performance de conduite. L'objectif est de disposer de métriques offrant une capacité de description de l'évolution de l'état de contrôle du conducteur lors de sa tâche de conduite. Elles doivent en particulier répondre à de nombreuses exigences telles que la tolérance aux variations naturelles de la conduite (variation intra et inter-sujet) ainsi que la sensibilité au scénario de conduite présenté. La discrimination entre variation due à une amélioration (ou dégradation) du contrôle du conducteur et variation naturelle s'avère nécessaire. Compte tenu de la complexité de la tâche de conduite, il n'existe pas de métrique générale et le choix d'un indicateur ne peut se faire sans prendre en compte le contexte de la conduite. Nous nous intéressons ici aux deux principales tâches de conduite qui sont le contrôle longitudinal et latéral du véhicule. Le contrôle longitudinal regroupe généralement la régulation de la vitesse du véhicule ainsi que la distance inter véhiculaire. Le contrôle latéral concerne le maintien de la position sur la voie et la prise de virage. C'est selon cette distinction que sont répertoriés les différents indicateurs présentés ici.

B.2 Contrôle longitudinal

Les indicateurs permettant de décrire la performance de contrôle longitudinal du véhicule sont classés ici en différentes catégories. Tout d'abord, sont présentés ceux liés aux pédales d'accélération et de freinage car elles sont en interaction directe avec les conducteurs. Puis, nous nous intéresserons aux métriques liées à l'état du véhicule (vitesse, accélération). Enfin, comme l'un des contextes du contrôle longitudinal concerne la conduite avec trafic routier, et

donc le suivi de véhicule, nous en détaillerons dans une dernière partie les indicateurs dédiés.

B.2.1 Indicateurs basés sur la pédale d'accélération

L'observation et l'analyse des mouvements de la pédale d'accélération peuvent fournir des éléments permettant de caractériser et de discriminer différents types de conduite. Le calcul de l'écart type de la position de cette pédale (*Acceleration Standard Deviation*) en est un premier exemple. Afin de caractériser plus précisément les mouvements de la pédale, il est possible de dénombrer, sur une certaine fenêtre temporelle, le nombre de fois où la vitesse de la pédale change de signe (*Acceleration Reversals*). Il est alors nécessaire de fixer au préalable des valeurs de seuils afin de ne prendre en compte que des mouvements d'une amplitude significative par rapport à l'objet de l'analyse, qu'ils soient importants (*Large Acceleration Reversals*) ou faibles (*Small Acceleration Reversals*). Toutefois, lors d'une conduite à vitesse stabilisée, les mouvements de la pédale d'accélération sont à priori atténués. Afin de quantifier ce type de situation, il est possible de s'intéresser au nombre de fois où la vitesse de la pédale est inférieure à un seuil fixé sur une periode également à déterminer (*Accelerator Holds*). L'idée est de choisir un seuil de vitesse suffisamment faible pour dissocier les phases d'accélération volontaire des phases de dérive ou de maintien de vitesse constante. De plus, le *Mean Acceleration Duration* et le *Total Acceleration Hold Time* définissent respectivement la moyenne du *Accelerator Holds* et la durée moyenne de maintien de la pédale d'accélération à une certaine position (vitesse quasi-nulle). De manière similaire, les relâchements de pédale par rapport à une position donnée sont exploitables en termes d'Accelerator *Releases*, *Mean Accelerator Release Duration* et *Total Acceleration Release Time*.

B.2.2 Indicateurs basés sur la pédale de frein

Les métriques dédiées à la pédale d'accélération peuvent être facilement étendues à la pédale de frein. Nous trouvons en particulier le décompte du nombre de pressions sur celle-ci (*Brake Applications*, *Abrupt Onsets of Brakes* ou brusques attaques de la pédale), la moyenne associée sur une durée quelconque (*Mean Brake Applications Duration*) et enfin la durée totale pendant laquelle le conducteur appuyait sur la pédale (*Total Brake Time*). Toutefois, la mesure la plus pertinente au niveau de cette interface est le temps de réaction du conducteur à un stimulus. Ce temps de réaction représente généralement l'écart de temps entre l'occurrence du stimulus et l'appui sur la pédale par le conducteur. Il englobe donc à la fois les temps de traitement de l'information, de prise de décision et d'action motrice. Une grande attention doit être portée

sur le contexte dan lequel apparaît le stimulus afin de s'assurer que le freinage du sujet ne résulte que de lui et non d'une nécessité due au trafic routier ou encore à la géométrie de la route. Il convient enfin de préciser qu'il existe plusieurs définitions d' "appui sur la pédale de frein". Il peut s'agir en effet d'un appui impliquant un enfoncement de la pédale supérieur à un seuil à définir ou bien d'une pression suffisante pour l'allumage des feux stop.

B.2.3 Indicateurs basés sur la vitesse, l'accélération du véhicule

Certains indicateurs classiques comme la vitesse moyenne, son écart type ainsi que ses valeurs extrêmes et leur évolution au cours du temps autorisent une première analyse de la performance du conducteur. Il en est d'ailleurs de même pour l'accélération longitudinale du véhicule. Il est aussi envisageable de s'intéresser non pas à la vitesse longitudinale du véhicule mais plutôt à l'écart entre cette vitesse et celle demandée au conducteur, au travers par exemple des limitations de vitesse en vigueur ou bien des consignes de l'expérimentateur. Là encore, le calcul de la moyenne, de l'écart type ou même du RMS sont des quantificateurs de la performance de conduite.

B.2.4 Indicateurs spécifiques au suivi de véhicule

Inter-distance et variations

La distance relative entre le véhicule suiveur et le véhicule suivi est une information essentielle à l'analyse de la performance de conduite dans le contexte du suivi de véhicule. Sa mesure est généralement immédiate sur simulateur de conduite alors qu'elle nécessite la mise en œuvre de capteurs spécifiques pour des véhicules réels. Toutefois, avec l'apparition des systèmes de type ACC (*Adaptive Cruise Control*), cette donnée tend à devenir plus accessible. L'inter-distance moyenne, ses variations (écart type) ainsi que ses minima locaux sont autant de critères couramment utilisés. Il est d'autre part possible d'évaluer à partir du RMS (*Root Mean Square*) la différence entre cette distance et celle reçue comme consigne par le conducteur.

Time Headway

Basé sur l'inter-distance, cet indicateur exprime le temps nécessaire au véhicule considéré pour parcourir la distance qui le sépare du véhicule le précédant. De cette manière, pour une distance inter-véhiculaire donnée, plus la vitesse d'évolution sera élevée, plus le *Time Headway* sera faible ce qui reflétera une situation potentiellement plus dangereuse. Il est calculé à partir de la vitesse

du véhicule considéré et de l'inter-distance $\Delta_{Distance}$:

$$T_{THW} = \frac{\Delta_{Distance}}{Vitesse_{Vehicule}} \tag{B.1}$$

L'intérêt du THW (ses variations, ses extrema) est d'être une grandeur concrète pour les conducteurs en ce sens qu'il est plus facile de suivre un véhicule à 2 secondes plutôt qu'à 50m. Une valeur nulle ou négative du $Time\ Headway$ signifie que les véhicules considérés sont entrés en collision.

Time-To-Collision

Le $Time\text{-}To\text{-}Collision$ (TTC) représente à un instant donné, le temps qui sépare deux véhicules qui se suivent. Cet indicateur est utilisé pour caractériser une marge de sécurité longitudinale. Il peut être calculé à tout instant et nécessite de disposer de la distance entre les véhicules concernés $\Delta_{Distance}$ ainsi que leur vitesse relative $\Delta_{Vitesse}$. Sa formulation est la suivante :

$$T_{TTC} = \frac{\Delta_{Distance}}{\Delta_{Vitesse}} \tag{B.2}$$

Plusieurs analyses du TTC sont décrites dans la littérature. Il peut s'agir de la proportion de temps où le TTC est inférieur à une certaine valeur définie arbitrairement ou non. Nous nous intéresserons également variations du TTC au cours du temps, ses extrema locaux (en particulier les minima) et sa moyenne. Plus la valeur du TTC sera faible, plus le conducteur se trouvera en situation à risque (sous l'effet d'une distraction ou de la réalisation d'une autre tâche par exemple). Contrairement au $Time\ Headway$, le $Time\text{-}To\text{-}Collision$ permet de discriminer des phases de rapprochement (minimum local) de celles dues à un ralentissement du véhicule suivi ou à une accélération du véhicule suiveur et ce par son signe qui dépend de la convention choisie pour le calcul de $\Delta_{Distance}$.

B.3 Contrôle latéral

Les indicateurs permettant de décrire la performance de contrôle latéral du véhicule par le conducteur peuvent être classés selon différentes catégories. La première d'entre elles se concentre sur des données provenant directement des conducteurs. Il peut s'agir de paramètres physiologiques (potentiel, conductivité épidermique) ou autres tels que les mouvements de regard. Toutefois, la récupération de ces données peut se révéler fort envahissante (port d'électrodes, de capteurs de regard) et lourde dans sa mise en œuvre (reconnaissance d'image, corrélation avec l'environnement). La seconde catégorie concerne les indices basés sur le volant tant au niveau de ses mouvements que de la pression appliquée par le conducteur sur celui-ci. L'intérêt du volant est d'être un

élément du véhicule "au plus proche" du conducteur du fait de son interaction directe avec ce dernier. Un autre avantage est la relative facilité de disposer de mesures d'angle ou couple volant. La troisième catégorie se révèle être plus générale dans la mesure où elle regroupe des indices décrivant l'évolution du véhicule avec son environnement. L'attention est alors portée sur l'état du véhicule (par exemple la position et l'orientation) sur la voie. Nous ne présenterons ici que des indices issus de la seconde et troisième catégories précédemment exposées.

B.3.1 Indicateurs basés sur le volant

La conduite peut être assimilée à une tâche de poursuite dans la mesure où le conducteur planifie une trajectoire et s'emploie à la suivre. Ce type de contrôle est alors généralement scindé en deux niveaux. Un premier niveau consiste à prédire à partir de l'état courant du véhicule, quel sera son état et sa position sur la voie dans un futur proche (de l'ordre de la seconde). Cette étape de prédiction ou d'anticipation est essentielle compte tenu de la plage de vitesses accessibles par le véhicule ainsi que du temps de réaction des conducteurs. Le second niveau se doit de corriger à chaque instant les effets de perturbations, non prises en compte par le premier niveau de contrôle. Ce type de contrôle est ainsi compatible avec des observations faites sur les spectres de fréquences de l'angle volant lors de différentes conduites présentant deux pics distincts (McLean et Hoffman, 1971). Notons qu'il ressort de cette étude que ce spectre de fréquences s'étend jusqu'à 2Hz. Enfin, il apparaît que le calcul des différents indicateurs basés sur le volant nécessite une précision spatiale d'au moins 0.5 degré.

Variance de l'angle volant

Il s'agit ici de l'étude de la variance de la position et de la vitesse de l'angle volant. Ces deux indicateurs sont cités dans Östlund et al., 2005. Ce type de mesures est relativement élémentaire et ne semble pas autoriser une discrimination franche entre une dégradation de la performance de conduite et les variations intrinsèques de la stratégie de contrôle.

Composante haute fréquence de l'angle volant

Le *High Frequency Component* (HFC) mesure la densité spectrale de puissance du signal pour une fenêtre de fréquence de 0.35Hz à 0.6Hz. Toutefois, comme le rappelle Östlund et al., 2005, il est préférable d'étendre ce calcul à une fenêtre plus large (jusqu'à 2Hz). Ces derniers soulignent l'importance de l'extension du spectre d'étude dont les composantes "hautes fréquences" sont

généralement négligées à tort en raisaon de leur faible amplitude (inférieure à 2°).

Steering Wheel Reversal Rate

Le *Steering Wheel Reversal Rate* (SWRR) représente le nombre d'occurrences de changements de direction du volant, mesuré en temps (généralement sur une minute) ou en distance. Cet indicateur nécessite la définition d'un seuil (*gap*) au-delà duquel les amplitudes des changements de direction sont prises en compte. La gamme de seuils possibles s'étend de 0,5 à 10 degrés (voir figure B.1). Plusieurs implémentations sont possibles (Östlund et al., 2005 telles que :

- filtrage passe bas (par exemple, filtre de Butterworth, du second ordre, fréquence de coupure de 0,6 Hz),
- détection des extrema locaux sur des fenêtres glissantes de largeur 0,8s (pour chaque fenêtre, seul le point central est testé),
- comparaison de l'amplitude entre un maximum (minimum) et un minimum (maximum) consécutifs avec le seuil.

Cet indicateur présente certaines contraintes. En particulier, le choix du seuil est délicat, une valeur trop faible conduirait par exemple à prendre en compte de faux changements (bruits). De la précision du capteur de l'angle au volant dépendra aussi le choix de ce seuil. Le SWRR s'interprète comme le nombre de corrections de trajectoire apportées par le conducteur. D'après McLean et Hoffmann (McLean et Hoffman, 1975), le SWRR est intrinsèquement lié aux composantes hautes fréquences de l'angle volant. Il est préféré à des analyses spectrales sur ce domaine de fréquences en raison de son coût de calcul restreint. Malaterre propose (Malaterre, 1994) une variante du SWRR basée non plus sur le dénombrement de changements de direction du volant par unité de temps mais par unité de distance. Selon ce dernier, cette version du SWRR est plus sensible à détecter la distraction du conducteur.

Steering Wheel Action Rate

Nous trouvons dans Östlund et al., 2005 une brève référence à cet indicateur. Similaire au Steering Wheel Reversal Rate, le SWAR est défini comme le nombre de mouvements du volant par seconde dont la vitesse est supérieure à un certain seuil. Il n'est toutefois pas précisé si tous les mouvements du volant sont à prendre en compte ou seulement les changements de direction.

Steering Entropy

Largement utilisé (Boer, 2000b, Boer, 2000a et Boer, 2005a), l'idée sous-jacente de ce critère est la suivante : lorsque le conducteur est perturbé lors de sa conduite (par une seconde tâche à réaliser par exemple), son comportement

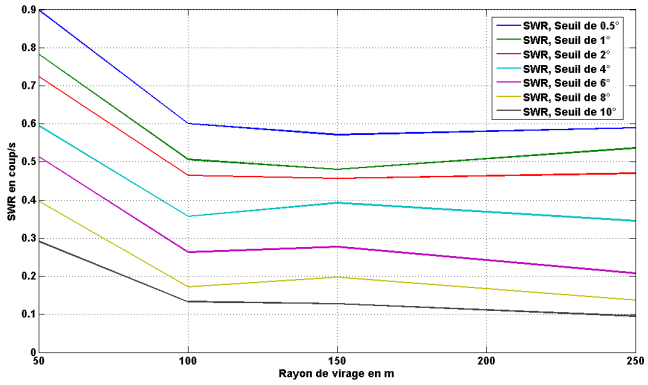


FIGURE B.1 – Le *Steeringwheel Reversal Rate* ne dépend pas seulement du seuil choisi mais aussi par exemple de la vitesse d'évolution du conducteur ou du rayon de virage comme indiqué sur cette figure (résultat obtenu pour un sujet sur simulateur dynamique de conduite).

devient moins prévisible car il doit opérer des manœuvres de correction. Une diminution de prédictibilité se traduit par une augmentation d'entropie. Il suffit alors de comparer pour une méthode de prédiction de l'angle au volant donnée, les distributions des erreurs de prédiction pour différents contextes.

La première étape consiste à choisir une méthode de prédiction de l'angle au volant. Selon Boer, 2005a, le choix porte sur un filtre auto-régressif dont les paramètres sont identifiés (méthode de Burg, des moindres carrés) à partir de la séquence de données correspondante à la conduite de référence. L'intérêt de cette méthode est de quantifier le bruit naturel de la conduite de référence par la structure même du modèle (présence d'une perturbation type bruit blanc). D'autres méthodes plus simples sont également utilisées, tel le développement de Taylor utilisé dans Nemoto et al., 2002. En notant $\theta_{(n)}$ l'angle volant courant, $\theta_{p(n)}$ la prédiction de $\theta_{(n)}$ au même instant, nous avons alors :

$$e_n = \theta_{(n)} - \theta_{p(n)} \tag{B.3}$$

$$\theta_{p(n)} = \frac{5}{2}.\theta_{(n-1)} - 2.\theta_{(n-2)} + \frac{1}{2}.\theta_{(n-3)} \tag{B.4}$$

Le 90^{me} percentile de l'erreur de prédiction θ_n est alors calculé et noté α. La distribution de l'erreur de prédiction est ensuite réalisée sur un nombre fini m de segments. Ici également les méthodes diffèrent (Boer, 2005a, Nemoto et al., 2002). La probabilité des erreurs de prédiction p_i est alors calculée pour chaque segment i. Il s'agit bien d'une discrétisation de la distribution de probabilité

des erreurs de prédiction. L'entropie est finalement obtenue par :

$$H_p = -\sum_{i=1}^{m} p_i.log_m p_i \tag{B.5}$$

Notons qu'il existe d'autres méthodes de calcul permettant de prendre en compte d'autres paramètres comme la vitesse du véhicule. Selon Nemoto et al., 2002 une augmentation du *Steering Entropy* est due à une conduite perturbée. Le point important, précisent-ils, étant de comparer les évolutions de ce critère par rapport à des conditions normales de conduite. Par ailleurs, les variations d'angle au volant sont propres à chaque personne, raison laquelle il est préférable pour des comparaisons inter-sujet de s'intéresser également au paramètre α.

Autres indicateurs basés sur le volant

Nous trouvons dans les travaux de Wierwille et al., 1996, plusieurs autres indicateurs dont l'utilisation est moins courante. Le $Peak\ Steering\ Deflection$ représente l'amplitude maximale atteinte par un mouvement du volant par rapport à une position de référence (généralement la position neutre). Le *Steering Holds* renseigne quant à lui sur le nombre de fois où la vitesse du volant est nulle (ou presque) pour une durée supérieure à celle d'un seuil fixée préalablement. Concernant ces différents indicateurs, aucune information ne s'est trouvée disponible quant à leur interprétation et gammes de valeur des seuils mis en jeu. Dédié à la conduite en ligne droite, le *Steering Zero Crossing* peut facilement être adapté à la conduite en virage où le nombre de franchissements d'une certaine valeur angulaire est cette fois comptabilisé. Cette valeur est déterminée à partir de la courbure du virage engagé et des caractéristiques de direction du véhicule. L'amplitude du mouvement du volant peut aussi être prise en compte afin d'éviter les franchissements dus à de faibles oscillations. D'autre part, il est possible de mesurer des temps de réaction à des stimuli à partir de données du volant telles qu'un déplacement d'une certaine amplitude, supérieure à une vitesse donnée. Il convient de pouvoir discerner de ces mouvements ceux inhérents à la tâche de conduite de ceux dus à une réaction au stimulus proposé. Lors d'une conduite en virage, le $Steering\ Time\ Response$ présentera certaines difficultés à être mesuré. Enfin, Wierwille et al., 1996 proposent d'autres indicateurs basés cette fois sur la manière dont est maintenu le volant. Ce type de métrique permet de quantifier le niveau de contrôle des conducteurs en admettant que lorsque le volant est maintenu par les deux mains, le conducteur opérera un contrôle plus robuste à des perturbations extérieures. Les mesures peuvent porter sur le nombre de fois durant la tâche de conduite où le conducteur saisit le volant des deux mains ($Hands-on-wheel\ occurrences$), la durée moyenne ou totale où il laisse ses deux mains dans la même position ($Mean$

hands − on − wheel duration et *Total hands − on − wheel time*). Toutefois, ce type de mesure nécessite un système de capteurs spécifiques ou simplement de caméras vidéo. Les études basées sur la mesure de la pression et de la force exercées par les mains sur le volant ont fait à ce jour l'objet de peu de publications.

B.3.2 Indicateurs basés sur la position, la vitesse et l'accélération du véhicule

Sont regroupés dans cette section les différents indicateurs caractérisant le contrôle latéral du véhicule, déduits soit de l'état du véhicule seul (par exemple la vitesse, l'accélération) soit de la prise en compte de paramètres liés à la voie sur laquelle il évolue (rapprochement, franchissement des bandes de délimitation). Cette seconde catégorie est appelée *Lane keeping Metrics* et s'exprime généralement en termes de distance ou de temps. Notons par ailleurs que le calcul des indicateurs cités plus loin nécessite une "ligne de référence" dont la définition peut être arbitraire (le centre de la voie), physique (le bord de la route, la ligne de séparation des voies) ou en relation avec une notion de sécurité (ligne imaginaire que le conducteur se fixe à ne pas dépasser et pouvant évoluer au cours de la conduite). Enfin, les conditions expérimentales doivent être strictement contrôlées de façon à bien prendre en compte le contexte de la conduite. En effet, les successions de lignes droites, de virages ainsi que les changements de files peuvent être source de biais lors de l'analyse de ce type d'indices.

Ecart latéral et déclinaisons

Il s'agit ici d'indicateurs basés sur la position latérale du véhicule. La mesure de la position moyenne (*Mean Lane Position*) et de son écart-type (*Lane Standard Deviation*) sont ainsi utilisés comme caractéristiques de l'état de contrôle du conducteur. Leur principal atout réside dans leur relative facilité de calcul par rapport à d'autres indices. En effet, la position du véhicule sur sa voie est une donnée directement accessible par les logiciels de simulation automobile telle que SCANeR. Il est possible d'observer les écarts maximaux du véhicule sur la voie (*Peak Lane Deviation*) ou encore le RMS de ces écarts (*Lane RMS Deviation*). Cette catégorie d'indices est couramment utilisée pour observer le comportement des conducteurs lors de changements de file. En revanche, ils ne paraissent pas adaptés lors d'une conduite en ville de par les nombreux événements extérieurs qui interviennent et perturbent ce dernier.

Time to Lane Crossing

Le $Time - to - Lane - Crossing$ (TLC) est défini comme étant le temps nécessaire au véhicule pour franchir les lignes de part et d'autre de la voie sur laquelle il se situe. Cet indicateur a été introduit par Godthelp et Konings, (Godthelp et Konings, 1981) pour décrire la manière dont le conducteur contrôle son volant et donc son véhicule. Le TLC est alors utilisé comme marge de sécurité temporelle du contrôle latéral du véhicule. En raison des fluctuations latérales du véhicule sur la voie lors d'une tâche de conduite, le TLC associé oscille à son tour. Lorsque ce critère atteint une valeur critique (minimum) propre au conducteur, à l'état de sa charge mentale,... Celui-ci décide alors de corriger sa trajectoire.

Cet indicateur peut être calculé de différentes façons. En particulier, sont fréquement considérées comme constantes la direction des roues ainsi que la vitesse du véhicule. Godthelp (Godthelp et Konings, 1981) prend en compte la vitesse du véhicule, l'angle au volant, l'angle de lacet ainsi que la position latérale sur la voie. Van Winsum et al. (Vanwinsum et Godthelp, 1996) proposent une variante basée sur la courbure de la route. La difficulté d'obtenir sur véhicule réel des mesures précises de ces informations conduit à des approximations. Les études sur simulateur permettent quant à elles d'avoir accès à tous les paramètres nécessaires. Kircher et al. (Kircher et al., 2002) rappellent la difficulté de calcul en temps réel de cet indicateur, justifiant ainsi le recours à diverses approximations :

- approximation d'ordre 1, le TLC est calculé à partir de la position latérale et de sa dérivée première,
- approximation d'ordre 2, le TLC est calculé à partir de la position latérale et de ses dérivées première et seconde,
- calcul par filtrage de Kalman (Chiu-Geng, 1995).

Enfin Peters et al. (Peters, 2000) mettent en évidence la difficulté de détecter les TLC minimaux. Ils évoquent en effet la possibilité que certaines instabilités du véhicule peuvent être à l'origine d'un minimum local non lié à la stratégie de contrôle du conducteur. Ils proposent de ne comptabiliser que des TLC inférieurs à 15s ainsi que le temps écoulé lors de l'aller-retour du TLC à la valeur de 15s et passant par un minimum local qui doit être supérieur à 1s.

Lane Exceedence

Le *Lane Exceedence* (LANEX) est défini comme le temps où une partie du véhicule est en dehors des lignes de délimitation de la voie sur laquelle il évolue. Son calcul nécessite la détermination d'une période d'observation, période durant laquelle est mesuré le temps total où le véhicule se situait en dehors

de sa voie. Notons que la détection précise de sortie de la voie d'une partie du véhicule nécessite de connaître la géométrie de ce dernier, sa position et son orientation.

Initié par Wierwille et al. (Wierwille, 1994), cet indicateur et ses variantes (Chen et Ulsoy, 2006) sont largement utilisés pour la détection de fatigue, d'endormissement ou d'inattention du conducteur (Tijerna, 1999). La période d'observation est un point essentiel de cet indicateur que Wierwille et al. fixent à une minute. Se révélant à priori simple en termes de calcul, celui-ci fournit toutefois aucune information avant le franchissement de voie et sa pertinence pour une conduite en virage ou pour un changement de file n'est pas démontrée. Enfin, il semble que la période d'observation soit a priori "élevée". Il est fréquent que certaines manœuvres soient exécutées en quelques secondes seulement.

B.4 Conclusion

Nous avons énoncé précédemment les principaux indicateurs mentionnés dans la littérature pour l'évaluation de la performance de contrôle des conducteurs. Qu'ils quantifient le contrôle longitudinal (maintien d'une vitesse de consigne, d'une distance inter véhiculaire,...) ou latéral (régulation de la position sur la voie,...), leur exploitation s'avère délicat si le contexte n'est pas rigoureusement contrôlé. Une variabilité trop importante de ces indices en conditions nominales amoindri l'impact de stimuli sur ces derniers. D'où la nécéssité de développer de nouvelles métriques capables de gérer ces variations naturelles (*Steering*, *Behavioral Entropy*). Notons par ailleurs la difficulté de quantifier le transitoire. Une grande partie des indicateurs présentés plus haut résultent de calculs nécessitant de plus ou moins longues fenêtres temporelles. Or, un conducteur étant capable de réagir et de s'adapter très rapidement à de nouveaux contextes (quelques secondes par exemple), dès lors il paraît délicat d'en observer l'impact sur des indices calculés sur une durée d'une minute par exemple. Leur intérêt pour la mise au point et la validation de modèles de conducteurs reste à définir. D'autres indicateurs les intègrent déjà : certains auteurs proposent en effet un modèle linéaire de conducteur pour le suivi de véhicule basé en partie sur une régulation du *Time Headway* (Boer, 2005a, Boer, 2006).

Annexe C

Communications

Sensorimotor adaptation and virtual force feedback

R. DEBORNE[1,2], G. REYMOND[2], A. KEMENY[2]

[1] MAS Laboratory, Ecole Centrale Paris.
[2] Technical Center for Simulation, RENAULT S.A.S.

Abstract

The objective of sensorimotor control modeling is to describe quantitatively how sensory information and prior knowledge of the environment are integrated to produce a desired action. It is generally assumed that the Central Nervous System has internal models of both body and environment dynamics. Its ability to learn, to adapt to a changing environment is crucial, for instance when a driver achieves to control a car he has never driven before. Here we use a virtual reality system and a force feedback arm to create a visuomotor experiment. The dynamics of the environment were altered during the tracking task. These modifications were not systematically noticed by the subjects, although they demonstrate a strong ability to achieve the task. Implications regarding the update of internals model are discussed.

1. Introduction

In everyday life people have to manipulate systems with a wide range of dynamical behaviors. It is suggested that the Central Nervous System (CNS) has representation of these systems which are called internal models. Yet their building mechanisms are still unknown. It also appears that these models are permanently self-calibrated. For instance, we demonstrate a strong ability to drive cars that we have never used before. This reveals that our control strategies can face environment changes without altering our level of performance. This phenomenon could be seen as our adaptation to a new context. We can reasonably wonder about the speed of this adaptation in the specific context of a tracking task.

1.1 Sensorimotor control and internal models

The internal model concept used in sensorimotor control modeling and they can be distinguished in three distinct families [1], [2].

Forward models. They describe the sensorimotor system in a causal fashion. From the current state of a limb (joint angles, torques) and a motor command signal, *forward dynamics models* compute a prediction of the future state of this limb. In a similar way, an internal model of the sensory system (forward sensory model) offers the ability to predict from the estimation of this new state the sensory flows it would produce.

Inverse models. This category of internal models computes adequate motor signals for desired movements. Due to the number of degrees of freedom of the motor apparatus, these computations have, mathematically a higher complexity. In fact, forward models produce a unique response. On the contrary, inverse models have to deal with existence, multiplicity of solutions.

Interacting objects models. The necessity to predict interactions with objects, systems requires the ability to construct internal representations of them. In our context, it means that subjects would be able to capture properties of the virtual mass-damper-spring system.

1.2 Sensorimotor adaptation

Here we focus on the adaptation process in visuomotor tasks. Altering dynamically a task such as reaching a target allows observing how people react. Adaptation describes their ability to continue the task they are asked even their environment has changed. There are different ways to alter the

subject environment. In our experiment, we generate changes on the dynamical system manipulated by the subjects.

1.3 Possible strategies

In the case of interaction in a varying force field, subjects could employ different strategies to perform their task [3].
Impedance modulation strategy. This first one is the co-contraction of muscles. By increasing the global stiffness (impedance) of the arm, the movement becomes more robust to external perturbations. In this case, the arm kinematics is maintained and then speed profiles of hand trajectory (for example) are not modified. The CNS does not try to compensate directly the perturbing force field.
Visual based strategy. This strategy is based on the use of the visual feedback to correct errors in trajectories. Without any internal models (no predictive abilities), this strategy is only adapted to slow movement, due to delays in the visual loop.
Compensatory strategy. The environment dynamics are learned by the CNS in order to produce arm motion taking it directly into account.

1.4 Adaptation studies

Held et al ([4], [5]) have investigated reactions to visual altered environments. Subjects were proposed a reaching task, wearing prism glasses which distorted their perception of the target to reach, shifting its position by 20 degrees laterally. At their first attempt, subjects missed the target with the same deviation induced by the prism. After many trials, subjects were able to succeed in the task. They showed their ability to modify the map giving the relation between the target position and their arm configuration. After removing the glasses, subjects missed the target in the opposite direction, showing persistence of adaptation. They named this phenomenon the *after-effect*.

Lackner and Dizio, [6] submitted their subjects to a reaching task with an artificially increased Coriolis force field produced by a rotating environment. This kind of force field is particularly dependent on the speed of moving objects and moving limbs. In this case, subjects were also able to reach the target after many trials. *Shadmehr, et al* [7] studied effects of different disturbing force fields produced by a robot arm where the end-effector was manipulated by the subjects. They also noticed after-effects when reaching the target when the perturbation was cancelled. They observed this effect was also present when the position of the target was in an unexplored space which is incompatible with the concept of look-up table dependent on the visited space. Both studies concluded that the compensation of perturbations reflected a common process of motor learning, the self-calibration and which could be achieved by the construction of an internal model of the perturbing force field. It also appeared that the adaptation process necessitates long practice (dozens to hundreds trials).

Takahashi [8] pointed out the predictability of force fields over trials in these previous studies and its influence on observed results. He added random noise on a perturbing force field. He noticed a reduction of the after effect and also a minimization of the subjects' trajectory errors. He concluded that it was due to the ability of the CNS to use both strategies: forming an internal model to predict and compensate environment changes, and increasing arm impedance to reduce prediction errors.

Dingwell et al [9] proposed a reaching task to their subjects who manipulated a virtual spring mass system with high stiffness. The mass was virtually attached to their hand with the spring. They had to reach the target with both their hand and the mass. The values of mass and spring stiffness were modified to always ensure a natural frequency of 1 Hz for the virtual system. The consequence is to offer kinematically equivalent systems. This means that for a same hand trajectory, different virtual systems would have the same response. They observed significant deviations in subjects hand speed profiles after a system modification which is inconsistent with an impedance modulation control. By simulating different control strategies, they concluded that a simple impedance controller without any internal model of the mechanical system could not reproduce observed responses. They also noticed that a controller integrating a model of both arm and object has a behavior compatible with experimental measures. Similarly to the previously, subjects needed dozens of trials to recover their level of performance.

2. Experiment

It appears that, in the context of reaching task the CNS is able to construct and tune internal models of perturbing force fields after many trials. Are these results consistent with a tracking task where subjects had to manipulate systems with internal degrees of freedom? To have some cues to answer this question, we designed an experiment with a virtual reality system integrating a programmable robot arm.

2.1 Materials

The virtual reality system includes a robotic manipulandum (www.haption.com) designed for virtual reality applications such as, for instance, virtual mock-up assembly tasks. This haptic device allows six-degrees-of-freedom movements. The

force available at the end-effector is 10 N continuously and 30 N instantly, in all directions. The experiment was developed with Virtools software (www.virtools.com). Physical computations were achieved through the Vortex physics engine running at 333 Hz (www.cm-labs.com). A video projector displayed images generated at 100 Hz on a widescreen with a resolution of 1024x768 pixels. Subjects stood at a distance of 3.5 m of the screen



Figure 1: Visual of the tracking stimulus

We measured that for different deviations from the central position, the error between applied and generated forces was around 10%.

2.2 Procedure

The virtual mechanism consists on a simple viscous spring. The movement is reduced to a one degree of freedom (DOF) in translation. To achieve the constraints on the other directions of translation, we used a built in function that offers to enable desired DOF and disable the others.

The virtual mechanism generates both position and speed dependent force fields. Its characteristics are as follows: a mass m of 500 g, a damper with a viscosity b of 1 N.s/m and a variable null length spring with two states stiffness k = 30 and 90 N/m, behaving as low pass filters with natural frequencies at 1.23 Hz and 2.13 Hz for the second one. The dynamics of the virtual mass could be described by the following equation:

$$m.\ddot{x} + b.\dot{x} + k.x = F$$

Equation 1 : virtual system dynamics

The predictability of the target trajectory improves the performance of subjects (*Hanneton,*[10]). In order to reduce target trajectory prediction errors, we chose a slow, cyclic pattern repeated twelve times for the target motion (see figure 2). By this way, we assume that observed tracking errors would be mainly due to motor control errors and not to trajectory planning. This pattern was made with a four point spline offering frequency content spread until 0.25Hz.

Nine subjects (two women and seven men) participated to this experiment, ranging in age from 24 to 27 years.

The subjects were proposed a tracking task. Through the manipulendum handle, subjects controlled a cursor represented by a red square on the screen (roughly 4cm per side). The target was a yellow sphere with an apparent radius of 3cm. Two horizontal bars were added to remind to subjects the horizontal constraint of movement (see figure 1). The target trajectory boundaries were -20 and 20cm.

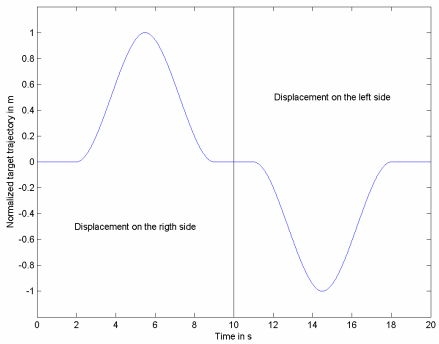


Figure 2: Normalized target trajectory profile

Subjects were asked to stand up, in front of the manipulendum, at a distance of approximately 40 cm. This distance was variable according to the subjects and was chosen to ensure their own comfort. They firmly hold the end-effector with both hands. The experiment was split in four phases:

Familiarization. Subjects interacted with the system during few minutes. The spring stiffness was set to 30 N/m.
Session 1. Subjects performed the task by manipulating the virtual mechanical system with a stiffness set at 30 N/m.
Session 2. During this phases, the spring stiffness was changed to 90N/m after finishing the sixth pattern.
Session 3. The stiffness was set at 90 N/m until the end of the sixth pattern. Then, it was decreased to 30 N/m.

2.3 Data Analysis

To quantify the subjects' performance, we identified the following indicator: *RMS*. The Root Mean Square is computed between target and (subject) virtual mass position for each pattern over the three sessions. It will describe the tracking performance.

3. Results

RMS. We computed the RMS for each subject and for each pattern for the three sessions. The advantage of this choice is to offer a criterion for repetitive similar conditions. The figure 3 represents the evolution of the average RMS for all subjects and its standard deviation. The RMS level is roughly constant during the first session and the first half of the second one. Just before the 19th trial, the stiffness is increased (event 1). We notice that the RMS also increases and needs only one trial to recover its previous level. At the beginning of the third session, the RMS level is higher than at the end of the second session. After one trial subjects recover their performance level. At the 31st trial, the change of the spring stiffness increases the RMS, at a lower level than during the 19th one (first event). Again, after one trial, the previous level of performance is recovered.

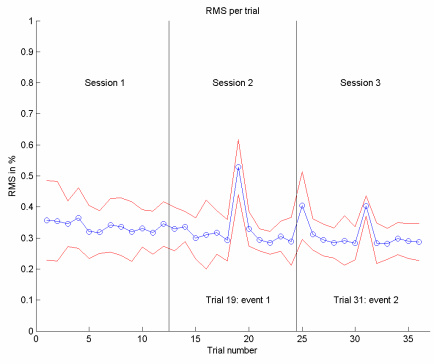


Figure 3:RMS on position results

4. Discussion

A consequence of the first event is to increase the force to produce for subjects to displace the virtual mass and then to track the target. It appears that their performance is altered by this event. In addition, they also show a strong ability to recover a score closed to the one they had before the event. If this phenomenon is due to learning of the new dynamics of the manipulated system, then it seems to be relatively fast (it requires only one trial). Concerning the second event (appearing at the 31st trial) we notice a different behaviour. In fact, even the increase of the RMS, its level is not as high as for the first one. There is no symmetry in subjects response even the level of force field variation is the same (only the sign is different) for both events. This could be due to many reasons such as the fact that subjects are not as naïve as during previous sessions. Subjects were asked to tell if they think to have to produce higher or lower efforts to move the robot handle. Concerning the first event, they reported that it was more difficult to move the virtual mass and they had to increase their efforts. They noticed it after few seconds of the 19th trial. Concerning the second event, they immediately react to the new dynamical context but they reported that it was due to a visual effect: the cursor moved too quickly than they expected. This can be explained by the fact that subjects prepared a movement which was adapted for a high stiffness spring. When the target started, the cursor moved more than expected because the spring stiffness had been decreased, which was not the case for the first event.

For the first trial of the third session, we noticed that the RMS has an abnormal level, higher than the one observed during the last trials of the second session. This phenomenon does not appear between the end of the first session and the beginning of the second one. It could be explained by the fact that subjects expected to manipulate the unaltered virtual system for which they practiced more trials than the modified one.

We have also to notice that concerning the third session, subjects were not as naïve as during the previous ones. This could explain that their level of error did not behave identically.

Whatever the control strategy used by the CNS, it appeared that subjects were able to face the varying environment they were presented. After only one trial, they were able to get their previous level of performance. In reaching tasks, subjects have to produce a point-to-point movement without any explicit constraint on the trajectory choice. This is a crucial difference in tracking tasks where action is planned for starting, ending and also intermediate points. Our trials could be seen as a succession of point-to-point reaching. Another reason of the observed speed adaptation could be a more important role of the visual feedback loop in the control architecture.

5. Conclusion and future work

It appears that subjects showed a strong ability to control dynamical systems that extend beyond their own bodies in the context of a tracking task. They were able to recover quickly (but not instantaneously) a previous level of performance. It would interesting to extend these results to a more complicated environment such as driving. Drive-By-Wire technologies allow defining steering wheel torque feedbacks independent of forces applied on wheels. This will be investigated in a future experiment using driving simulators.

A tracking task could be described as a combination of many strategies [11]:

- a pursuit loop producing open loop-motor commands according to a desired movement,
- a compensatory loop working like a closed-loop controller, correcting errors on the movement and using feedback sensory cues.

Each loop could integrate internal models [12]. We are developing an adaptive sensorimotor model based on it. In addition, internal model paradigms have equivalents or are relatively closed to adaptive control theories [13]. It provides frameworks for deterministic/stochastic adaptive controllers and state estimation. However many questions have to be investigated such as on-line/off-line learning processes, specifications of exciting signals for building/tuning internal models.

References

[1] Kawato, Internal models for motor control and trajectory planning. Current Opinion in Neurobiology, 9:718-727, 1999.

[2] Miall & Wolpert, Forward models for Physiological Motor Control, Neural Networks, Vol. 9, No. 8, pp. 1265-1279. 1996.

[3] Morasso and Sanguinetti, Modelling Motor Control Paradigms, in Computational Neuroscience – A comprehensive approach, Jianfeng Feng Editor, Chapman & Hall/CRC, 2003.

[4] Held & Schlank, Adaptation to disarrandged eye-hand coordination in the distance-dimension. Am J Psychol 72:603-605, 1959.

[5] Held, Adaptation to rearrangement and visual-spatial after-effects, Psychol Beitr 6:439-450, 1962.

[6] Lackner & Dizio, Rapid Adaptation of Arm Movement End-Point and Trajectory to Coriolis force Perturbation. Soc Neurosci, Abstract 22, 1992.

[7] Shadmerh et al, Adaptive Representation of Dynamics during Learning of a Motor Task, The Journal of Neuroscience, 14(5): 3208-3224, May 1994.

[8] Takahashi et al, Impedance control and internal model formation when reaching in a randomly varying dynamical environment. J Neurophysiol 86: 1047-51, 2001.

[9] Dingwell et al, Manipulating objects With internal Degrees of freedom: Evidence for Model-Based Control, Journal of Neurophysiology 88:222-235, 2002.

[10] Hanneton, Le Contrôle de la Dynamique des Mouvements, Application à l'étude d'une tâche de poursuite visuo-manuelle, PhD thesis, 1999.

[11] McRuer Human dynamics in man-machine interface, Automatica, vol. 16, no. 3, 1980.

[12] Wolpert et al, Computational principles of movement neuroscience. Nature neuroscience supplement, vol. 3, November 2000.

[13] Tin and Poon, Internal models in sensorimotor integration : perspectives from adaptive control theory, J. Neural Eng. 2 S147-S163, 2005.

SIMULATION STUDY OF DRIVER STRESS AND PERFORMANCE TO AN UNEXPECTED STEERING CRITICAL EVENT

R.DEBORNE[1,2], A.BARTHOU[2], D.TOFFIN[2], G.REYMOND[2], A.KEMENY[2]

[1] MAS Laboratory, Ecole Centrale Paris

[2] Technical Center for Simulation, RENAULT S.A.S

Abstract

In this paper, we study the effect of unexpected behaviour of a Driving Assistance System (DAS) on the driver, during a common task of driving in a virtual environment. The considered system is an electrical steering, which allows drivers to reduce efforts needed to handle the steering wheel during cornering manoeuvres. A failure of such system could produce a sudden and permanent loss of steering assistance and make the steering wheel more difficult to turn.

The objective of this study is to determine how this event will affect the driver's performance, particularly in terms of stress and visual performance. Driver's ability has already been noticed to adapt to this kind of event if it occurs before entering a curve. Moreover, an increase of muscle stiffness has been observed during lane change manoeuvres, which provide a more robust control of the steering wheel to external perturbations. At last drivers are able to manage a sudden increase of stress. The experiment was conducted on the ULTIMATE dynamic driving simulator developed by the Technical Centre for Simulation of RENAULT. The simulator has been fitted with a new steering force feedback system improving dynamical performance. This simulator upgrade and assessment methodology will be presented in more details in this paper.

The driver behaviour was studied through questionnaires to assess the stress produced by the different situations. Detection and/or recognition of objects in the virtual scene give cues on the DAS failure effects on the driver visual attention. In order to quantify the driver performance, objective indicators such as steering reversal rate, steering entropy and time-to-lane-crossing were also used. In spite of the unexpected steering event, all drivers have achieved their driving task, without leaving the road. Results show an increase of stress for drivers when the unexpected event occurs. We also notice an alteration of the visual performance revealed by drivers' difficulties to recognize critical objects in the environment. This study suggests that high-performance driving simulators may be valuable to assess the effects of safety-critical events on driving performance.

Résumé

Dans cet article, nous étudions l'effet sur le conducteur d'un comportement inattendu d'un système d'aide à la conduite (DAS) et ceci lors d'une tâche de conduite ordinaire en environnement virtuel. Le système retenu est une direction assistée électrique qui permet au conducteur de réduire les efforts nécessaires à produire pour le maniement du volant en virage. Une défaillance d'un tel système peut produire une perte soudaine et permanente d'assistance et rendre ainsi le volant plus difficile à tourner.

L'objectif de cette étude est de déterminer l'impact de ce type d'évènement sur les performances du conducteur. Seront considérés en particulier la performance visuelle et la production de stress. Il a été constaté que lorsque cet évènement apparaît avant l'entrée en virage, les conducteurs sont capables de s'y adapter. De plus, une augmentation de la raideur des muscles du bras a été observée lors de manœuvres de changement de file, ce qui rend le contrôle du volant plus robuste à des perturbations extérieures. Enfin, il semble que les conducteurs sont capables de gérer un stress soudain et de courte durée. L'expérimentation a été réalisée sur le simulateur de conduite dynamique ULTIMATE développé au Centre Technique de Simulation de RENAULT. Le simulateur s'est vu doté d'un nouveau restituteur d'effort pour le volant, offrant des performances dynamiques supérieures au précédent restituteur. L'installation et la validation de ce nouveau matériel sera présentée dans de plus amples détails.

Le comportement des conducteurs a été étudié au travers de questionnaires afin d'évaluer la production de stress lors des différentes situations. La détection et/ou la reconnaissance d'objets dans la scène virtuelle procure des indices quant aux effets sur l'attention visuelle du conducteur de la défaillance du système d'assistance. Dans le but de quantifier la performance de conduite, des indicateurs tels que le Steering Reversal Rate, le Steering Entropy et le Time-to-Lane-Crossing ont été utilisés. Malgré que l'évènement soit inattendu, tous les conducteurs ont réussi à terminer leur tâche de conduite sans quitter la route. Les résultats montrent une augmentation du stress lorsque cet évènement apparaît. Remarquons aussi l'altération de l'attention visuelle des conducteurs de part leur difficulté à reconnaître les objets de l'environnement. Cette étude suggère que les simulateurs de conduite à hautes performances autorisent l'évaluation des effets sur la performance de conduite d'évènements critiques en termes de sécurité.

Introduction

In order to improve drivers' safety, car manufacturers have developed a wide range of Driving Assistance Systems (DAS) such as ABS, ESP… The understanding by the drivers of the behavior of these systems is a major challenge that designers have to cope with. A DAS can for instance change the perceived car dynamics and create a discrepancy between the observed and expected car behavior for the drivers. In particular, in case of system failure, we may wonder how the drivers will react to it. In this paper, we study the effect of an unexpected behavior of an electrical power steering system, during a common driving task. The system considered reduces efforts needed to turn the steering wheel during cornering maneuvers; failure of such system produces a sudden and permanent loss of steering assistance and makes the steering wheel more difficult to turn.

Questions

In such a situation we can expect different reactions from the driver. Immediately after the event occurrence the driver can manage the torque feedback increase and continue his driving task, or can be unable to stabilize the steering wheel and drive off the road.

The possible management of this event arises a question on the driver control properties. In fact, different control strategies may allow successfully carry out the steering task. The natural robustness of the driver neuromuscular system may be sufficient to deal with a perturbation. Pick & Cole [1] measured an increase of muscle stiffness and arm impedance during change lane maneuvers. Driver may also update the internal representation [2] of the steering wheel dynamics. Toffin et al [3] highlighted the driver's ability to adapt different steering wheel force feedback. They studied different steering wheel control laws which were modified on straight road segments in order to avoid the necessity of the driver to deal with sudden torque changes at the steering wheel. It was observed that subjects were able to maintain their level of performance in cornering maneuvers and could adapt immediately to such events. In our experiment we were interested in the overall capacity of the drivers to deal with steering wheel assistance system failure thus also with increased of torque feedback occurring while driving in a curve.

The surprise effect and the possible generated stress could also modify the driver control performance. Nevertheless, Matthews mentioned in [4] that a sudden stress due to a brief and unexpected event may be quickly regulated. This stress can be more important as the difficulty of the situation understanding increases and alters the driver performance. Westman suggests in [5] that strategies used to regulate the stress may induce an increase of the mental workload. Such a variation of the mental workload can reduce the size of the functional visual field size (which allows particularly the detection and recognition of objects) [6]. Then, the stress produced by the unexpected event can impair the driver task in terms of visual performance reduction.

Materials

Simulator

The experiment was conducted on the ULTIMATE dynamic driving simulator developed by the Technical Centre for Simulation (CTS) of RENAULT in the framework of a European

research project (Eureka # 1493 consortium: RENAULT (leader), SEOS Ltd., Rexroth-Hydraudyne, CNRS-LPPA). A cylindrical screen made of three single-chip DLP projectors creates a 150°x40° field of view for the front view. Two LCD screens replace rear view mirrors. An XY rails motion system coupled with a Hydraudyne 6-DOF hexapod platform generates the movement. The simulator is running under the modular software SCANeR© II developed initially by the CTS and in cooperation since 2005 with OKTAL, which manages each subsystem, generates the traffic, records experimental data. The validation of the simulator performances is achieved at different levels, from basic platform dynamics, real-time vehicle model accuracy to subjective vehicle tests [7].

Electrical power steering

In order to provide a high performance torque rendering device for the steering wheel, a benchmarking of different Electric Power Steering systems (EPS) was conducted at the CTS in cooperation with other services. The aim of the study was to identify their performances in comparison with the current device fitting ULTIMATE. The performance characterisation of the different competing EPS was achieved through two axes of study. On one hand, dynamical performances were identified through objective criteria and on the other hand, the perceived torque rendering was measured.

The characterisation of the EPS dynamics was performed through the study of their response to different test signals:

- Torque steps from 0 to 2, 4, 6, 8 and 10 N.m to measure the device torque rise time response.
- Torque steps from 2, 4, 6, 8 and 10 to 0 N.m to measure the device torque descent time response.
- Sinusoidal signals to identify bandwidth and phase diagrams.
- The resolution and noise level on angle position and speed measures were also quantified (see table 1).

For these tests, two EPS were considered: A and B. The A system is an open calculator and is directly torque controlled via the CAN network. The B system had to be modified by the CTS to allow the torque control feature.

EPS device	Steering wheel angle [°]	Noise level on the angle [°]	Steering wheel angle speed resolution [°/s]	Noise level on the angle speed [°/s]
A	0.1	0	0.3	0.3
B	0.1	0.1	2	2

Table 1: Steering wheel angle position and speed measures

Moreover a subjective evaluation of the EPS is accomplished by Renault expert drivers, assessing the following criteria: dead zone around zero, the simulated steering limits. The device chosen for ULTIMATE is the system A, which was rated 7/10 at the subjective evaluation, according to a RENAULT steering wheel customer evaluation scoring grid. Such score guarantees that the device satisfies the customers' requirements of vehicle performances defined by vehicle engineering. The EPS was integrated in the simulator in early 2007 (see figure 1).

Method

Subjects

Seven drivers took part in the experiment (age 23 to 28). They were not accustomed with simulators but working at RENAULT. They also carried a driver's license for more than two years.



Figure 1: EPS fitted in ULTIMATE

Training session

In order to get accustomed with both the simulator and the itinerary they had to follow, drivers had to achieve two different 5 minutes sessions. During the first one, they had to drive on a open area. They were requested to make at different speed both right and left turns and slalom (approximately 1Hz frequency and 30° amplitude for the steering wheel movements). We expected subjects to discover the dynamical behavior of the simulated car and of the steering wheel. A second session was dedicated to learn the itinerary, the test curve and the environment.

Task

Subjects had to perform a double task: to drive at 70 km/h as naturally as possible, and to look out for objects in the environment. No vehicle to follow was used to control the driver speed. The environment was a rural highway with oncoming traffic (see figure 2). The studied curve had a 100 m radius. Each driving session lasts 5 minutes. Subjects are thus asked to drive normally, and they have to look out for a “hidden” bicycle in the environment.



Figure 2: Visual environment before the steering event, showing the hidden cyclist.

During the experiment, cyclists had a random position for each of the five sessions. But in each possible position, cyclists were equally distinguishable to the driver. The unexpected steering critical event is a sudden increase of the torque feedback during a cornering

maneuver simulating a loss of electrical power assistance. The nominal torque level is 3 N.m during the curve and reaches 6 N.m when assistance is altered. The event occurs before passing the third truck on the right side of the road.

Data collection
Data from the simulation are collected using SCANeR© II and sampled at 20Hz.

Objective indicators
In order to quantify the driving performance, we chose the following criteria:

- **Lateral deviation**, a basic lane keeping indicator [8].
- **Time-to-Lane-Crossing** (TLC) through the SCANeR© II built-in function also provides cues on changes on the driver safety margins [9].
- **Steering Wheel Reversal Rate** [8] and **Steering Entropy** [10], to quantify the alteration of the primary driving task. These indicators are suited for long and multiple tasks contexts but their relevance for short duration driving with critical event is not yet established.

Subjective indicators
The study of subjective indicators was based on a questionnaire (see the table1) filled at the end of each session, including the following topics:

- **Stress** perceived by the subjects.
- Quality of the **objects detection**.
- **Situation understanding** (only for the session where the unexpected event occurred).

We used the Phi² test [11] to assess the correlation between the quality of object detection and the unexpected event. This test allows quantifying independence between two variables regardless to limited numbers of subjects.

Stress perceived by the subjects
Did you easily manage to drive the vehicle on the simulator? *
Did you think to drive a real car? *
Which was the level of stress generated by the driving situation? *
Quality of the objects detection
Did you see an object near one of the truck?
If "Yes": - Can you recognize it?
- Near which truck was it?
Situation understanding
What did happen?
Did you feel something different with the steering wheel?
What did you think during that event?
Did you feel in a dangerous situation?

Table 2: List of questions asked to subjects

* Subject had to give a grade on a scale from 0 to 7.

Results

Lateral deviation
During all trials, every subject succeeded to keep his or her vehicle inside their lane. The steering event systematically increases the mean lateral position value without affecting the standard deviation. However, the levels of standard deviation values are high and similar to

their mean values, close to 30cm.

TLC

We measured the range of TLC values and the number of its oscillations for nominal driving of each subject and compared with the values from the altered condition. All subjects (except one) showed similar TLC profiles during different driving conditions (see figure 3). We noticed for the subject 2 a sudden decrease of its TLC when the steering assistance which was quickly corrected. He succeeded in few seconds to recover a "normal" TLC profile.

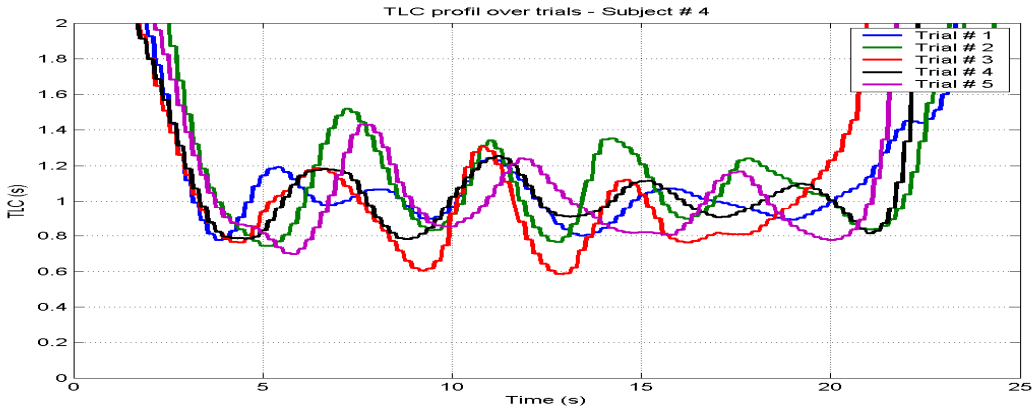


Figure 3: Typical TLC profils over trials – (Subject # 4)

Steering Entropy

The Steering Entropy was computed as described in [10] for each subject and trial. It is based on a prediction algorithm. The predicted steering wheel angle is compared with subjects' experimental measures. The Steering Entropy H_p is defined as:

$$H_p = -\sum_{i=1}^{m} p_i \cdot \log_m p_i$$

Equation 1: Steering Entropy formula, p_i is the probability of prediction errors falling into one of the m bins (9 in the present study).

We present the mean Steering Entropy over subjects for each trial. The first trial is used as a baseline for the computation of the steering entropy of the other trials. We notice an increase of the Steering Entropy during the 4th trial where the unexpected event occurs.

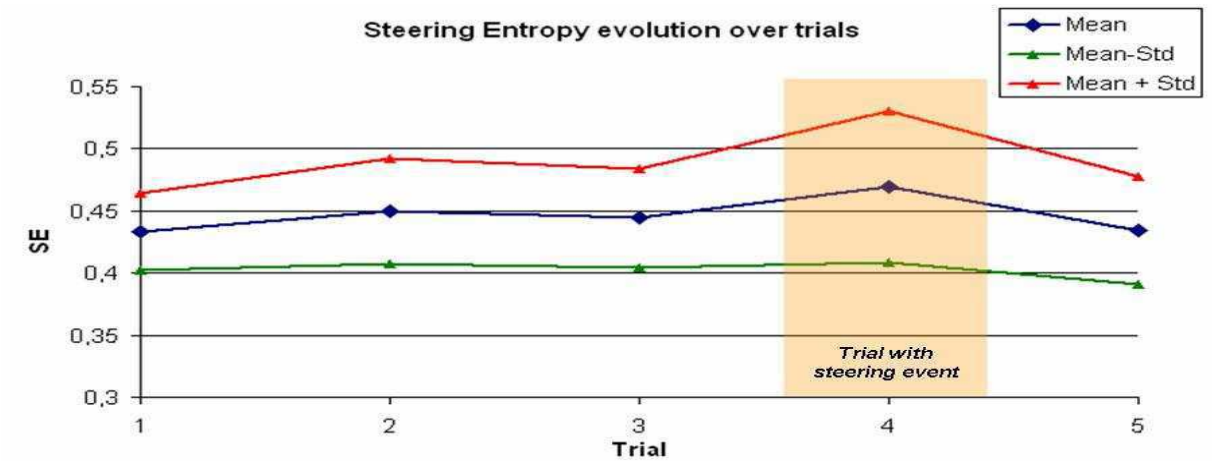


Figure 4: Mean SE over subjects per trial

Steering Reversal Rate
We computed the Steering Reversal Rate for each subject and trial, counting the number of steering wheel direction changes over than a considered threshold (2°). Subjects maintained the indicator during the 4th trial at the same level than during the others (mean 0.2 change/s, standard deviation 0.03 change/s).

Questionnaires - Stress perceived by the subjects
No subjects reported difficulties to drive the simulator (mean value 5.7 on a level 0 to 7 over the subjects, maximum grade 7 means "no difficulty encountered") and no one suffered from simulator sickness. During nominal trials, no stress was reported (mean value 1.3 on a level 0 to 7 over the subjects, minimum grade 0 means "no stress during the driving"). On the contrary, the stress level increased when the failure occurred (mean value 3.2 on a level 0 to 7 over the subjects, minimum grade 0 means "no stress during the driving").

Questionnaires - Quality objects detection
In nominal sessions, the displayed cyclist in the visual environment was seen more easily than in altered session. The Phi² test shows that the link between the kind of session and the cyclist detection is "intermediate". The couple "altered session" and "no object detection at all" contributes the most to the Phi² (i.e. there is more "no object detection" during this trial).

Questionnaires - Situation understanding
Although all subjects had the same steering wheel event, only one didn't feel in danger at all, another was worried about hitting the cyclist, or two other considered that the situation could have been dangerous on a real car, but not on a simulator. In addition, even all subjects felt the increase of steering wheel force feedback, only one has combined it with an EPS failure.

Discussion

In this paper, we studied the effects of steering assistance loss during a cornering manoeuvre.
Objective indicators. The effects of the unexpected event do not seem to affect the Time-to-Lane-Crossing and the Steering Reversal Rate: they do not appear to be suitable indicators for characterizing the driver adaptation process. The event occurrence systematically increases the mean value of lateral deviation: subjects shift on the left side of the road. This can be interpreted as a choice to increase their safety margin from road border. The Steering Entropy seems to increase during the altered session. It can be interpreted as a modification of the mental workload allocated to the both tasks. This modification can be due to the sensorimotor adaptation process.
Subjective indicators. The unexpected event increased the level of stress perceived by the subjects but no one decided to stop the vehicle, they all continued their task. The event also seems to reduce the visual performance of the subjects. They tended to link the event with an experienced situation. The only subject who correlated the event with a failure of the EPS had already faced it in a real vehicle. Then, no subject felt in danger during the steering assistance loss. They reported that they knew they were in a simulator and thus safe.

The experiment was conducted with a limited numbers of drivers: all tendencies observed above will require experiments with a higher number of subjects.

The effects of an unexpected event on the driver performance can be partly appraised with

objective and subjective criteria. Nevertheless, they are limited as to the understanding of the driver adaptation processes. Numerical models of the driver control attempt to describe the involved processes in the driving task. Modelling the driver behaviour for cornering manoeuvres such as lane changing has been extensively investigated. The lateral control task is often considered as a multi level control inspired from tracking tasks such as described in [12]: a pursuit level producing open loop-motor commands according to a desired movement and a compensatory loop working like a closed-loop controller, correcting errors on the movement and using feedback sensory cues (cf. figure below).

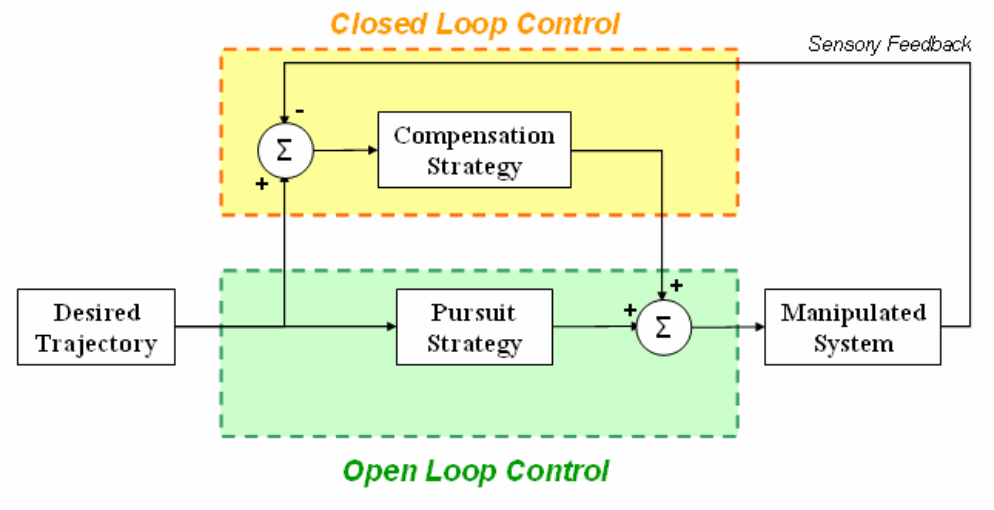


Figure 5: Typical tracking model architecture

The pursuit level represents the driver anticipation ability over a finite time horizon. In fact, drivers are able to preview the future desired road path and also to predict the future vehicle response. A well-known preview model is proposed by McAdam [13] where the driver is assumed to behave like a linear optimal controller by computing a steering angle minimizing the future path error. Others models such as [14] are extensions of the McAdam model by taking into account others variables of the vehicle state such as the yaw angle. This kind of models often includes an internal representation of the vehicle dynamics.

There are two main approaches to model the compensatory level. In the crossover model [15], the driver-vehicle system is considered as a whole and its performances are studied without describing its internal structure. The global behaviour is linearized and the transfer function of both components is made of a gain, an integrator and a delay term. The limitations of this approach are the model validity which is only around the crossover frequency, the non accuracy of the driver behaviour and the assumption that the human is trained to the manipulated system. In addition, parameters are assumed to be constant. The second way is to describe separately each element of this interaction. This solution offers a better modularity and allows easier parameters modification. However it requires representing low levels aspects such as the neuromuscular driver system.

For both levels of lateral control, compensation and anticipation, it is generally assumed that the driver behaviour is already fully learnt. However, we notice the model proposed in [16] which preview level is based on an adaptive internal model of the vehicle dynamics. But this feature is only used to easily calibrate the driver model (no vehicle control and learning possible simultaneously). Other authors, for instance Pick and Cole who propose a driver

model [17] which compensation level includes a muscle stiffening loop.

Future work includes developing a new driver model presenting a real time adaptation capability of both levels of control. The Pick and Cole model presents two limitations that we want to overcome:

- The neuromuscular system adaptation is modelled in normal driving context and not in varying environments due to for instance a mechanical failure. This can induce large differences such as the level of muscular response (higher and faster stiffening). Due to their similarities, we chose to use the high gain adaptive control theory [18] to describe the increase of arm impedance.
- The anticipation level is static and no learning of the new context properties is considered. Extraction of information about the varying vehicle dynamics during the driving will also be integrated.

The present study does not allow to discriminate the origin of driver adaptation which is maybe due to exclusively pursuit or compensation levels or both of them. A way to detect adaptation of the pursuit level and then the building/update of an internal model is made through the observation of the classical *after-effect* [19] which will be the aim of our future experiments.

Conclusion

This study confirms the previously observed plasticity of the human control in driving. Furthermore, in our experiment subjects succeeded to perform their driving task in spite of the occurrence of unexpected steering wheel control law change during cornering manoeuvres. Drivers' ability to face critical events seems to be fast and efficient, as it is shown by the corresponding Time-to-Lane-Crossing and Steering Reversal Rates. The increase of Steering Entropy reveals changes in subject's mental workload allocation, which suggests an increase of stress and/or the execution of subsequent adaptation processes. This adaptation capability is to be further studied to a better integration in vehicle engineering. Future work includes the design of a new driver model, inspired from adaptive control theory with real time adaptive mechanisms.

References

[1] A.J. Pick and D.J. Cole, "Neuromuscular dynamics in the vehicle driving task", Vehicle System Dynamics Supplement 41, Supplement, 182-191, 2004.

[2] D. Wolpert et al, "Computational principles of movement neuroscience". Nature neuroscience supplement, vol. 3, November 2000.

[3] D. Toffin et al, "Role of steering wheel feedback on driver performance: driving simulator and modeling analysis", Vehicle System Dynamics, Vol. 45, N°4, April 2007, 375-388.

[4] G. Matthews, "Towards a transactional ergonomics for driver stress and fatigue", Theor. Issues in Ergon. Sci., 3(2), 195-211, 2002.

[5] M. Westman, "The relationship between stress and performance: the moderating effect of hardiness", Human performance, 3(3), 141-155, 1990.

[6] E. M. Rantanen, J.H. Goldberg, "The effect of mental workload on the visual field size and shape", Ergonomics, 6, 816-834, 1999.

[7] M. Dagdelen et al, "Validation process of the ULTIMATE high-performance driving simulator", DSC 2006 Europe, pp. 37 – 48, 2006.

[8] Östlund et al, "Driving Performance Assessment – Methods And Metrics", Internal devilerable, IST-1-50-76-74-IP, 2005.

[9] H. Godthelp, "Vehicle driving during curve control", Human Factors 28: 211-221,1986.

[10] E. R. Boer, "Steering entropy revisited", PROCEEDINGS of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design? 2005.

[11] H. Rouanet, B. Le Roux, Statistique en sciences humaines, Editions DUNOD, 1995.
[12] McRuer, “Human dynamics in man-machine interface”, Automatica, vol. 16, no. 3, 1980.
[13] C. C. McAdam, “Applications of an optimal Preview Control for simulation of Closed-Loop Automobile Driving”, IEEE Trans. Syst., Man Cybern., SMC-11: pp. 393-399, 1981.
[14] R.S. Sharp et al, “A mathematical model for driver steering control, with design, tuning and performance control”, Vehicle System Dynamics, Vol. 33, pp 289-326, 2000.
[15] Krendel, “The Man-Machine Concept”, Proceedings of the IRE, 50:1117-1123, 1962.
[16] A.Y. Ungoren, H. Peng, “An Adaptive Lateral Preview Driver Model”, Vehicle Systems Dynamics, Vol. 43, N°4, pp. 245-260, 2005.
[17] A.J. Pick and D.J. Cole, “Neuromuscular dynamics in the driver-vehicle system”, Vehicle System Dynamics, Vol. 44, Supplement, 624-631, 2006.
[18] Tin and Poon, “Internal models in sensorimotor integration: perspectives from adaptive control theory”.J Neural Eng. Sep;2(3 S147-63.), 2005.
[19] Held & Schlank, “Adaptation to disarranged eye-hand coordination in the distance-dimension”, Am J Psychol 72:603-605, 1959.

Current psychology letters

Numéro 22, Vol. 2, 2007 (2007)
22, Vol. 2, 2007

Aurore Capelli, Renaud Deborne and Isabelle Israël

Temporal Intervals Production During Passive Self-Motion in Darkness

Avertissement
Le contenu de ce site relève de la législation française sur la propriété intellectuelle et est la propriété exclusive de l'éditeur.
Les œuvres figurant sur ce site peuvent être consultées et reproduites sur un support papier ou numérique sous réserve qu'elles soient strictement réservées à un usage soit personnel, soit scientifique ou pédagogique excluant toute exploitation commerciale. La reproduction devra obligatoirement mentionner l'éditeur, le nom de la revue, l'auteur et la référence du document.
Toute autre reproduction est interdite sauf accord préalable de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France.

Revues.org est un portail de revues en sciences humaines et sociales développé par le CLEO, Centre pour l'édition électronique ouverte (CNRS, EHESS, UP, UAPV).

Electronic reference
Aurore Capelli, Renaud Deborne and Isabelle Israël, « Temporal Intervals Production During Passive Self-Motion in Darkness », *Current psychology letters* [Online], 22, Vol. 2, 2007 | 2007, online since 16 septembre 2007. URL : http://cpl.revues.org/index2672.html
DOI : en cours d'attribution

Éditeur : Centre PsyCLE
http://cpl.revues.org
http://www.revues.org

Document accessible en ligne à l'adresse suivante : http://cpl.revues.org/index2672.html
Document généré automatiquement le 11 mars 2009.
© All rights reserved

Aurore Capelli, Renaud Deborne and Isabelle Israël

Temporal Intervals Production During Passive Self-Motion in Darkness

Introduction

1 Numerous studies suggested that motion reproduction without vision (during vestibular and somatosensory stimulation) could rely on time processing. Likewise, a number of projects investigated time estimation responses during additional sensory stimulation (Treisman, Faulkner, Naish, & Brogan, 1990; Burle & Bonnet, 1997; Burle & Casini, 2001). However, little attention is devoted to the interactions between self-motion and time processing. This paper examines the influence of self-motion and particularly of vestibular (and somatosensory) stimulations on human timing capacities.

2 Self-motion is the motion of the whole body (with the head), that can be measured mainly by the vestibular system. The detection of linear acceleration is due to the otoliths (Young, 1984), while the semi circular canals respond to angular acceleration (Guedry, 1974).

3 The vestibular contribution to distance estimation and to path integration in darkness has been studied in various researches (Georges-François, Grasso, Berthoz, & Israël, 1995; Loomis, Klatzky, & Golledge, 2001; Mittelstaedt & Mittelstaedt, 2001). The main results demonstrated an overestimation of the travelled distance in darkness. Israël et al. (2004) found that while vestibular information was insufficient to accurately estimate the traveled distance, time estimates were used. Furthermore, when the participants were asked to reproduce the previously traveled distance, the duration of their response was as accurate as the distance (Berthoz, Israël, Georges-François, Grasso, & Tsuzuku, 1995). Recently, Glasauer, Schneider, Grasso and Ivanenko (2007) used a dual-task paradigm during reproduction of travelled distance tasks and showed that both motion distance and duration reproductions were impaired with cognitive load. Thus, self-motion and temporal processing seem interdependent.

4 Several studies underlined that time and space processing seem interrelated. Lappe, Awater and Krekelberg (2000).reported a compression of space at time of saccades. The apparent position of objects briefly flashed is perceived shifted at the position of the saccadic target. Morrone, Ross and Burr (2005) describe a similar compression phenomenon but for time. When the temporal interval between two pairs of bars were presented just before the saccadic onset, shorter and more precise temporal interval estimations were found than longer before or after the onset. The authors suggested that those distortions may rely on a common neural mechanism. Furthermore, Walsh (2003) proposed A Theory Of Magnitude (ATOM) that posits that time, space and quantity are part of a generalized system.

5 How is time processed? Several authors suggested that there are at least two types of timing processing (Fraisse, 1963; Lewis & Miall, 2003; Mauk & Buonomano, 2004; Rammsayer & Lima, 1991). Timing in the duration range of milliseconds to one second is an automatic process mainly associated with motor behaviour (i.e. production of skilled movements such as finger tapping). On the other hand, the timing mechanism of intervals in the range of seconds stands for duration discrimination and implies cognitive processes.

6 Several models focused on timing of motor behaviour. The behavioural theory of timing (BeT) (Killeen & Fetterman, 1988) is an alternative to the cognitive model of scalar expectancy theory (SET) (Gibbon, 1977; Gibbon & Church, 1990). According to the BeT, pulses from an internal pacemaker generate transitions between states correlated with "adjunctive" behaviours, coming to serve as conditional discriminative stimuli for temporal processing. The pulses rate of the pacemaker was shown to be proportional to the frequency of reinforcement. More recently, Ivry (1996) and Ivry & Richardson (2002) proposed the Multiple Timer Model

to account for the timing of short-range duration. This model assumes the existence of a time system constituted of a set of hourglasses that would be duration- and task-specific, and of a central gating process that provides the link between the time system and the motor execution. Those two models posit that automatic timing is based on timer(s) tuned to represent particular intervals.

7 According to Ivry & Richardson (2002) and Ivry & Spencer (2004), the time system responsible for the representation of intervals of short-time range is located in the cerebellum. Indeed, patients with cerebellar damage showed impairments during accurate timing required for production task (finger tapping), perceptual duration judgement task and eyeblink conditioning (Ivry & Keele, 1989; Mangels, Ivry & Shimizu, 1998; Nichelli, Alway, & Grafman, 1996; Perrett, Ruiz, Mauk, 1993). Recently, Gerwig et al. (2003, 2005) showed that the timing of conditioned eyeblink responses was impaired for patients with cortical cerebellar degeneration and lesions of the superior cerebellum but not for patients with lesions restricted to the posterior and inferior cerebellum.

8 Interestingly, the cerebellum receives vestibular and proprioceptive information (Barmack, 2003). Since the cerebellum is involved in both vestibular processing and timing functions, we posit that self-motion stimulating the vestibular system could lead to special timing processing perturbations.

9 Only few results are known about time estimation under vestibular modality. Frankenhaeuser (1960) showed that subjects seated at the end of a rotating arm (3g centrifugal acceleration) reproduced temporal intervals systematically shorter than when stationary.

10 Semjen, Leone and Lipshits (1998A) observed a decrease in the accuracy and regularity of timing under microgravity, where the otolith signal reference is missing. Using the Wing and Kristofferson (1973) decomposition of variance analysis, they found an increase of the central timer variance (and not of the motor execution variance) under microgravity. Semjen, Leone and Lipshits (1998) proposed that perturbations of the central timer under microgravity are due to reduced vestibular and proprioceptive afferent signals to the cerebellum.

11 These two results suggest an influence of the vestibular stimulation on timing.

12 In the present study, a temporal interval production task was used, requiring to push a button each second. We examined whether passive self-motion in darkness, stimulating the vestibular (and somatosensory) system, could perturb time estimation accuracy, regularity or evolution, compared to immobility. We expected that varying velocity profiles would produce an effect due to the vestibular stimulation exerted on the internal timekeeper.

Participants

13 Ten healthy right-handed volunteers (4 men and 6 women, aged 22 to 36 years) participated in the experiment, after giving informed consent to the protocol compliant with the local institutional ethical committee.

Experimental set-up

14 The participants were blindfolded and wore headphones delivering white noise. They were seated on a mobile robot (Robuter: Robosoft, France) controlled by a PC micro-computer (see Berthoz et al. 1995), which can rotate about the earth-vertical axis and can move linearly. The participants were required to push a button held in their right hand. The button presses and the position of the robot (detected via optical odometry) were sampled throughout the experiment at 100 Hz. The maximal linear velocity of the robot is 1m/s and its maximal angular velocity 60°/s. The corresponding maximal accelerations are $1 m/s^2$ and $60°/s^2$.

Procedure

15 The participants were instructed to press the button once each second. The task was performed without training and no feedback was available to the participants about their

performances.Furthermore, no instruction was given about the strategy to correctly estimate the temporal intervals of one second

16 Each trial contained two phases: one phase without motion (No Motion Phase, lasting about 15 s), followed by a phase with self-motion (Motion Phase). The participants were requested to press the button without pausing throughout the two phases. The motion phase was always performed after the no motion phase, as in Israël et al. (2004) the motion trials had no influence on the no motion trials performance.

17 Passive displacements were used in order to limit possible influences of motor signals. Indeed, Mittelstaedt and Glasauer (1991) found that distances were differently estimated during walking compared to passive transport.

18 Motion stimuli were leftward rotations or forward translations (cf. table 1), simulating respectively the semi-circular canals or the otoliths.

19 Since the vestibular system detects acceleration but not constant velocity, displacements with various velocity profiles were used. Motion phases with constant velocity and with varying velocity profiles were applied.

20 With constant velocity, the initial and final acceleration pulses were 1m/s² or 60°/s² and velocities were 0.6m/s or 35°/s (cf. figure 1). The motion phase lasted about 25 seconds, and the subjects were supposed to press the button at least 20 times.

21 With varying velocity, upward and downward velocity ramps (respectively positive and negative acceleration) were used. In downward velocity ramps, the initial acceleration pulse was high (1m/s^2 or 60°/s²) and brief (approximately 1 s), up to 1m/s or 60°/s, while the subsequent deceleration step was minimal (0.08m/s^2 or 4.60°/s^2) and prolonged (15 s) (cf. figure 1). On the contrary, in upward velocity ramps, the initial acceleration step was low (0.08m/s^2 or 4.60°/s^2) and prolonged (15 s) with the same peak velocity as in the downward ramps, and the final deceleration was high (1m/s^2 or 60°/s²) and short (approximately 1 s). The motion phases lasted about 15 seconds, so that the subjects pressed the button at least 10 times.

22 The imposed motion parameters (both velocity and acceleration) were higher than the vestibular detection threshold.

23 In the figures, the No Motion Phases and the Motion Phases are distinguished by different colors (white for the No motion Phases and black for the Motion Phases). The trials are indicated with abbreviations: it begins with “R” for rotations, and with "T" for translations; then the second letter indicates the velocity used during the motion phases: “C” for constant velocity , “D” for down velocity and “U” for up velocity.

24 Table 1

25 Motion Phase characteristics (velocity, distance and duration) as a function of all trials (constant, up and down), separately for rotations and translations.

ROTATIONS			
	Velocity (°/s)	Distance (°)	Duration (s
Constant (RC)	35	750	22
Up (RU)	0-60	480	14
Down (RD)	60-0	480	14
TRANSLATIONS			
	Velocity (m/s)	Distance (m)	Duration (s)
Constant (TC)	0.6	15	24
Up (LU)	0-1	10	16
Down (LD)	1-0	10	16

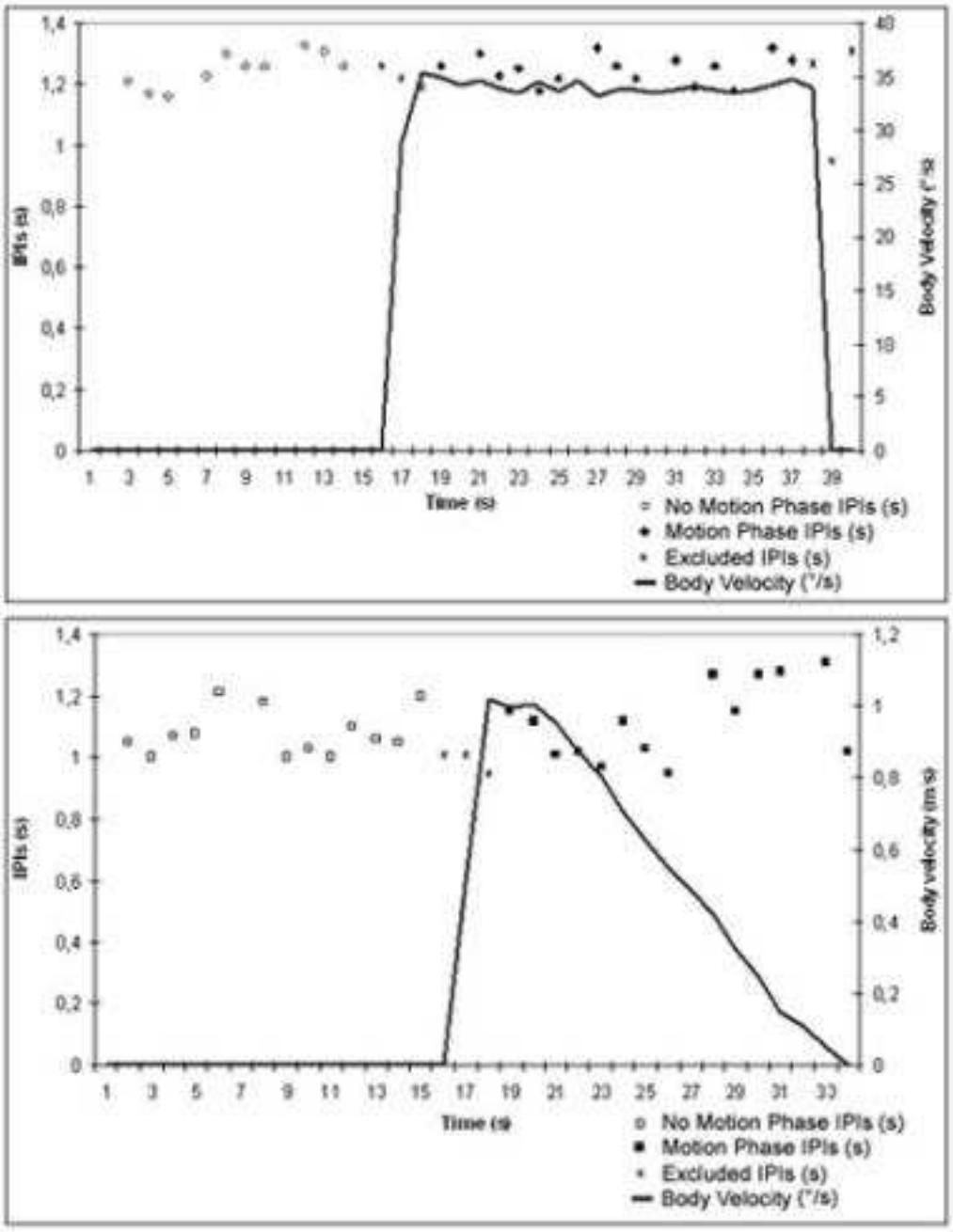


Figure 1. *Up figure*: sample recording obtained during RC for participant 6. Inter-Push Intervals (IPIs) in s and rotation velocity (in °/s) over time (in s).
Low figure: sample recording obtained during TD for the same participant. Inter-Push Intervals (IPIs) in s and translation velocity (in m/s) over time (in s).

Rotation and translation stimuli were presented in two separate blocks whose order was systematically varied among the participants. The 3 trials inside each block (constant, upward and downward velocity) were in random order. Each block was repeated three times. The whole experiment thus included 18 trials and lasted about one hour.

The experiments took place in the 50 m long corridor of the LPPA at the Collège de France (Paris).

Data analysis

31 No criterion of exclusion of the participants on the basis of their performance was applied. All button presses recorded during No Motion phases were analyzed.

32 During Motion phases with constant velocity only the presses executed during true constant velocity were taken into account, so the first and last three presses, corresponding to respectively initial and final acceleration were excluded.

33 Similarly in the varying velocity trials, during Motion Phases, only the presses recorded during acceleration (Up trials) or deceleration (Down trials) were considered, so either the last three presses were not included (Up trials: the robot decelerates at the end of the trial motion) or the first three presses (Down trials: the robot accelerates at the beginning of trial motion).

34 The accuracy of the inter-press intervals (IPIs) was examined by computing their mean. The regularity of button presses was evaluated on the basis of the IPIs coefficient of variability (standard deviation divided by the mean). In order to analyze the evolution of subjects' press rate along the trial, the slope of the linear regression between the IPIs (Y) and press number (X) was computed, through the "robust fitting of linear models" computed with the R software. We applied this robust fitting because it is less sensitive to outliers than the ordinary least squares regression. This analysisuses an iteratively reweighted least squares algorithm, with the weights at each iteration calculated by applying the bisquare function to the residuals from the previous iteration.

35 Finally, the Collier and Ogden analysis (2004) was applied (cf. figure 4) to determine the source of the data variability. The Wing and Kristofferson analysis (1973) is usually used to analyse the variability of timing of repetitive discrete motor responses, but in the presence of a drift in the tempo, the Collier and Ogden analysis is preferred. These authors extended the Wing and Kristofferson model and subdivided the variance into three components: clock, motor and drift variance. The clock and motor variance estimates are close to that proposed by Wing and Kristofferson:

36 Clock variance is estimated by

$$\hat{\sigma}_c^2 = 3S_2 - 2S_1$$

37 and the motor variance is

$$\hat{\sigma}_M^2 = S_1 - S_2$$

38 where S1 and S2 are given by

$$S_1 = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=2}^{n} (Y_i - Y_{i-1})^2$$

$$S_2 = \frac{1}{2(n-2)} \sum_{i=3}^{n} (Y_i - Y_{i-2})^2$$

39

40 Yi stands for the intertap interval.

41 The drift variance can then be estimated by subtracting the clock and motor variance estimates from the total sample variance

$$\hat{\sigma}_D^2 = s^2 - S_1\left(\frac{2}{n}\right) - S_2\left(\frac{n-2}{n}\right)$$

42 Variance estimates can be negative. The common strategy is to set negative variance estimates to zero (Collier and Ogden, 2001, 2004). This strategy was applied on our data.

Statistical Analysis

43 The Shapiro-Wilks test was used to assess the normality of the data. The distributions were found to be normal, allowing to perform Repeated measures ANOVA. The results were considered as statistically significant at $p < 0.05$.

Results

44 In the No Motion phases the participants pressed the button about 13 times, and in the Motion phases the button was pressed 19 times with constant velocity and 12 times both with down and up velocities.

"Effect of the repetition"

45 As each trial was repeated three times, we checked that there was no effect of the repetition on the performance. In 3 separate ANOVAs called decomposition of variance, the dependent variables were mean IPIs, coefficient of variation of the mean (SD/M) and slope. For all 3 ANOVAs, the random factor was the subjects and the fixed factor was the replication number. No significant effect of the replications was found (all $F(2,18)<2.33$ and all ps> 0.12). This allowed to pool the 3 repeated trials data obtained between replications.

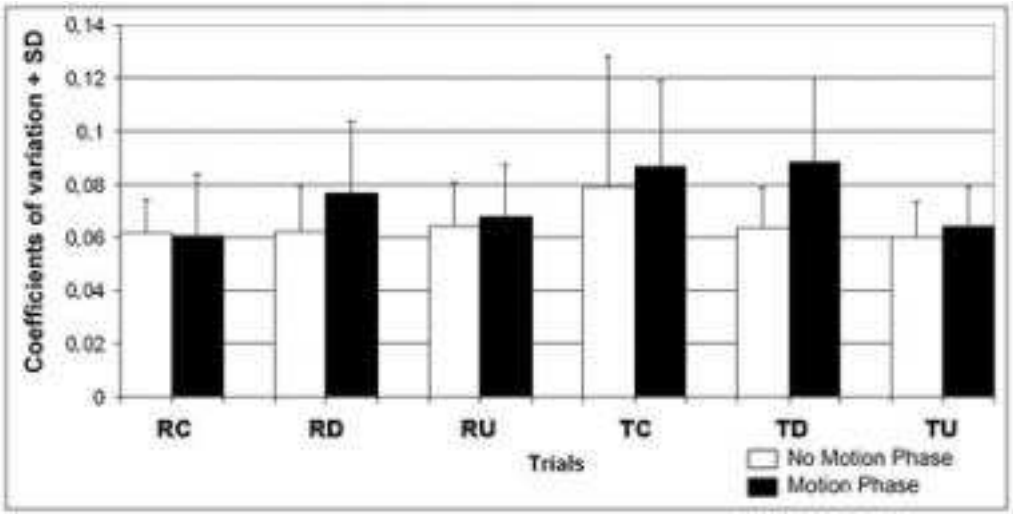
46 We then performed repeated measures ANOVA with 3 within factors (type of motion (Type): rotation, translation; the type of velocity (Velocity): constant, up, down; the presence of self-motion (Phase): no motion phase, motion phase) to determine whether some of these factors perturbed the temporal productions accuracy, regularity or pushing rate evolution.

Mean Inter Push Intervals (IPIs)

47 The mean inter-press intervals (IPIs) of all the trials was first examined. The ANOVA revealed no main effect of the Phase, Type or Velocity on mean IPIs, but a significant Velocity X Phase interaction: $F(2,18) = 6.43$, $p=0.008$. With motion the mean IPIs were shorter than without, for up and constant velocities but not systematically for down velocity. For up and constant velocity, the mean IPIs without motion were respectively 1.31 (± 0.08 s) (mean (± SD), n=10) and 1.26 (± 0.045 s) whereas with motion it was 1.26 (± 0.08 s), and 1.23 (± 0.08 s). For down velocity, the mean of IPIs was 1.25 (± 0.1 s) without motion and 1.25 s (± 0.08 s) with.

Variability of Inter Push Intervals

48 The variability of the IPIs, reflected by the coefficient of variation of mean IPIs was assessed.



49 **Figure 2**. Coefficient of variation (in s), averaged over all the subjects and replications, as a function of all trials, separately for the No Motion and Motion Phases.

50 We performed the same ANOVA on the IPIs coefficients of variation and found that they were significantly lower for the phases with no motion than with motion ($F(1,9)= 5.23$, $p=0.048$). During the No Motion Phase the mean IPIs coefficient of variation was 0.065 (± 0.021 s) and during the Motion phase it was 0.074 (± 0.025 s). An interaction between Type X Velocity (for both phases) was also revealed ($F(2,18)=4.71$; $p= 0.023$). Coefficients of variation were higher for translations (TD and TC) than for rotations (RD and RC) in trials with down and constant velocity but not with up velocity (cf. figure 2).

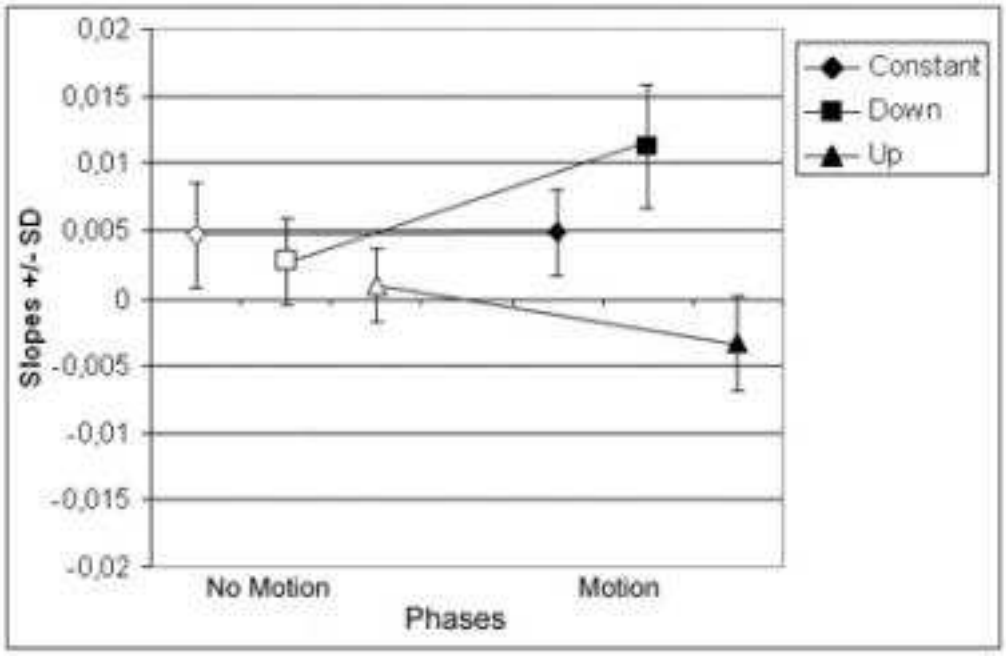
Slopes of the robust regression between the IPIs and the press number

51 In order to analyze the evolution of subjects' press rate along the trial, the slopes of the robust regression between the IPIs (Y) and press number (X) over the course of each trial were computed (cf. figure 3).

52 Table 2: Mean slopes, intercepts, correlation coefficients (r^2) and residual standard errors on the degrees of freedom of the robust fitting of linear models between the pressing number and the corresponding IPI as function of all trials, separately for No Motion and Motion Phases.

	Slopes				Intercepts				r2		Residual standard errors	
	No Motion Phases		Motion Phases		No Motion Phases		Motion Phases		No Motion Phases	Motion Phases	No Motion Phases	Motion Phases
RC	0,0003	(NS)	0,0002	(NS)	1,22	(<0.01)	1,16	(<0.01)	0,004	0,038	0,092 /37	0,094 /37
RD	0,0003	(NS)	0,0098	(NS)	1,23	(<0.01)	1,21	(<0.01)	0,048	0,121	0,134 /37	0,125 /25
RU	0,0003	(NS)	0,0117	(NS)	1,23	(<0.01)	1,24	(<0.01)	0,006	0,033	0,103 /32	0,102 /31
TC	0,0004	(NS)	0,0001	(NS)	1,29	(<0.01)	1,24	(<0.01)	0,007	0,008	0,093 /37	0,097 /40
TD	0,0002	(NS)	0,0023	(NS)	1,27	(<0.01)	1,21	(<0.01)	0,045	0,056	0,195 /32	0,129 /28
TU	0,0002	(NS)	0,0053	(NS)	1,29	(<0.01)	1,26	(<0.01)	0,031	0,068	0,109 /36	0,111 /25

53



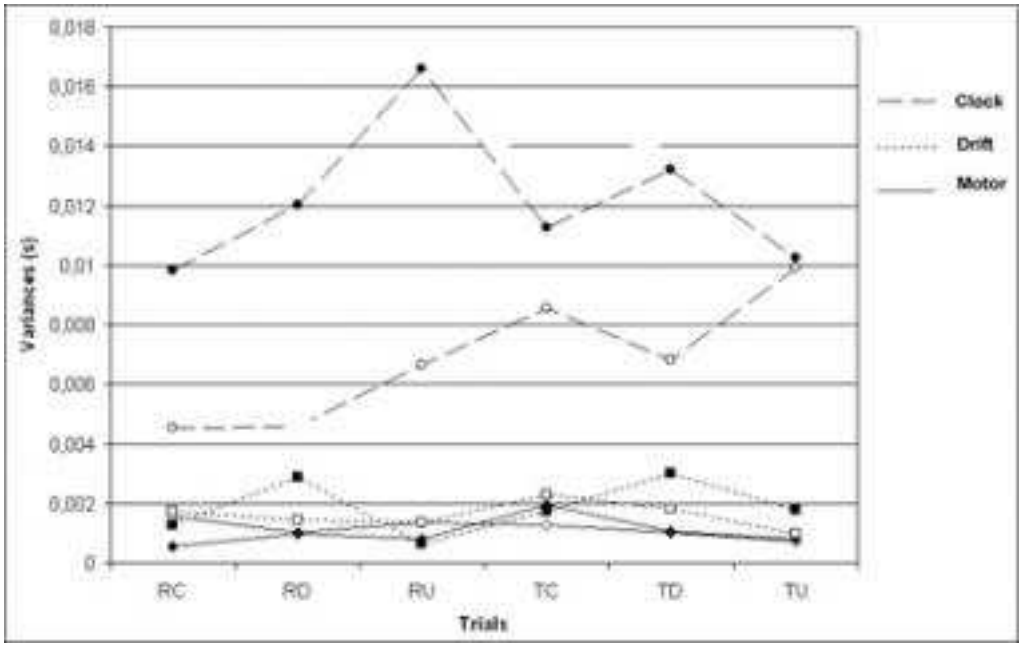
54 Figure 3. Mean slopes ± S.D. of the regression lines between the pressing number and the corresponding IPI against Phase (No Motion and Motion), separately for Up, Down and Constant velocities.

55 The Velocity significantly influenced the slopes (i.e., the pressing rate evolution), F (2, 18) = 5.06 ; p= 0.018. With the Tukey post-hoc test it was found that for up velocity trials, the slopes were weaker than for down and constant velocity trials, and were mainly negative (-0.004 ± 0.006). The slopes for down and constant velocity trials were mainly positive and steeper (respectively +0.003 ± 0.008 and +0.0003 ± 0.005). The ANOVA also revealed a significant Velocity X Phase interaction (F (2, 18) =5.18; p= 0.017) (cf. figure 3). Whereas the slopes were similar with constant velocity during No Motion and Motion phases, the slopes in the varying velocity trials changed between no motion and motion phases. For up and down velocity, the slopes were respectively: 0.0002 (± 0.006),and +0.0002 (± 0.009) during No

Motion Phase, and during Motion Phase they were -0.009 (± 0.007) and+0.006 (± 0.009). For constant velocity, the slopes were 0.0002 (± 0.004) with and 0.0003 (± 0.006) without motion.

"Timekeeper, motor delay and drift variability"

56 Collier and Ogden (2001) proposed a test statistic (Q), to determine the presence of a drift in the data. Applying this test evidenced the presence of a drift in our data, and thus we performed the analysis proposed by Collier and Ogden (2004) rather than the Wing and Kristofferson's one (1973). The variance estimates of the clock, drift and motor execution were computed (cf. figure 4)



57 Figure 4. Clock, drift and motor variances for all trials, separately for the No Motion Phases (in white) and the Motion Phases (in black).

58 We performed the same repeated measures ANOVA with 3 within factors (Type, Velocity and Phase) on each source of variance. No significant effect was found (all $F(2,18)<4.15$ and all $ps> 0.07$), however the timer variance estimates were systematically higher in the phases with motion than without motion (cf. figure 4). The mean clock variance was 0.0068 (± 0.0062) without motion and 0.0122 (± 0.0137) with motion, whereas the motor variance was 0.0012 (± 0.0014) without motion and 0.0010 (± 0.0010) with motion, and finally the drift variance was 0.0016 (± 0.0018) without motion and 0.0019 (± 0.0022) with motion.

59 We then averaged the variances of each participant across replications and trials. The variance estimates were 0.0095 (± 0.0100) for the clock, 0.0011 (± 0.0012) for the motor implication, and 0.0018 (± 0.0020) for the drift. Thus the graduation between the different variances is similar to that of the usual results (Collier and Ogden, 2001; 2004).

Discussion

60 The primary focus of this study was to examine whether self-motion in darkness has an effect on subjective timing capacities. The estimation of one second was investigated through button presses while the blindfolded participants were passively moved linearly or angularly at constant or varying velocities.

61 The durations produced by the subjects always exceeded the target interval, which is opposite to what is usually found with the production method (Hornstein & Rotter, 1969). Perhaps the response tool used, requiring the participants to push the button and then to release it rather than just touching the device used in tapping tasks (Vanneste, Pouthas, & Wearden, 2001), decreased the responses rhythm. However, the unexpected temporal overshoot could also be

attributed to mental counting. As counting was not forbidden, participants may have used it. The overshoot of the second may thus be due to the additional delay of verbal or mental count preceding the press. As our question was about the effect of self-motion on subjective time, this general bias should not jeopardize the results.

62 The first finding was a change in timing accuracy (mean IPIs) during self-motion. Indeed, the mean IPIs were shorter with motion than without, for up and constant velocity. The results also showed that the variability of the button presses was affected during self-motion as the coefficients of variation were greater with motion than without.

63 We expected changes in timing during varying velocity trials only, but it was not the case. Indeed, during Down velocity ramps (negative acceleration), the accuracy of the pressing rate was not impaired, and moreover constant velocity motion had an influence on timing accuracy and regularity.

64 The fact that constant velocity motion also influenced timing capacities could be partly explained by the vestibular aftereffects (of motion). During rotations after an acceleration pulse, the aftereffects due to canal dynamics decay with a time-constant of approximately 15-20s (Cohen, Henn, Raphan, & Dennett, 1981). In our experiment, the aftereffects during the first 15-20s of rotations may thus have influenced the temporal intervals production.

65 Another explanation is cognitive: Wertheim, Mesland and Bles (2001) submitted their participants to linear self-motion in darkness. When the participants ignored the kind of motion they would experience, they perceived tilts (a well-known vestibular effect), but when they knew it this illusion was (cognitively) suppressed. In the present experiment also, the subjects knew that they were moving because a) they felt the initial acceleration, and b) a motion phase always succeeded a no-motion phase. This knowledge of the planned motion may have cognitively influenced timing mechanism in a similar way as real motion.

66 Finally, the increased response rate (shorter productions) during motion could partly explain the shorter responses in distance estimation found in Israël et al. (1993, 2004).

67 Moreover, an acceleration effect on the tapping rate evolution was evidenced, since in constant velocity the rate was similar during No Motion and Motion phases but it changed between both phases in the varying velocity trials. The participants decelerated their pressing rate during self-motion deceleration, and accelerated their rate during self-motion acceleration. The slopes magnitude can partly explain the stronger variability obtained during self-motion.

68 The results reported in this study support that vestibular and somatosensory stimulation disturbs temporal production (accuracy, regularity and rate). But what is the role of the vestibular stimulation on temporal processing? Several suggestions are here reviewed.

69 In the present study, timing was explored through a production task involving a motor response (of the thumb). The problem is to dissociate the vestibular effect on motor behaviour from that on timing per se. Indeed, the vestibular stimulation may have modified timing processing or may have increased the speed of movement (button push) or both. The Collier and Ogden analysis (2004) was applied to resolve this problem. We expected that vestibular-somatosensory stimulation would modify timing processing only, but it was not the case. Indeed, with vestibular stimulation the timer variance was systematically higher than without, but not significantly. Motor and drift variance estimates did not increase during motion. Based on the systematic and exclusive increase of the timer variance with motion, the greater variability was mainly attributed to the internal timekeeping.

70 Another possibility is that vestibular stimulation increased the activation level devoted to time (arousal). Indeed, Treisman et al. (1990) demonstrated that when adding trains of sensory stimuli, the intervals appeared to last longer and time productions were shorter. Their explanation was that the additional sensory stimulation increased arousal which would consequently increase the output pacemaker frequency. Various replications of this experiment confirmed the main findings (Burle & Bonnet, 1997; Burle & Casini, 2001; Droit-Volet & Wearden, 2002; Penton-Voak, Edwards, Percival, & Wearden, 1996). Adding a

vestibular stimulus could also have shortened the produced intervals. Fetterman and Killeen (1991) showed that the changes in the amount and in the probability of reinforcement affected the temporal discrimination accuracy. They proposed to attribute those perturbations to changes in the pacemaker rate.

71 It is also possible that in our experiment, self-motion distracted participants' attention from time processing. Macar, Grondin and Casini (1994) and Casini and Macar (1997) reported that dividing attentional resources with dual task generates time distortions: a shortening of perceived time (that results in longer temporal productions) and/or an increased variability in timing. Although our experiment was not designed to generate a dual task, it is possible that self-motion in darkness distracted attention from time processing. However, since in the present experiment, self-motion led to shorter temporal productions than no motion, our results are contrary to the classical ones with dual task. On the other hand, the increased variability observed during self-motion is not contrary to the divided attention hypothesis. Indeed, it is plausible that the various velocity profiles distracted the participants from the temporal task. However, as the slopes can partly explain this increased variability during self-motion, it seems difficult to explain why attention should increase the pressing rate during acceleration and decrease it during deceleration but remain constant during constant velocity. For this reason, we do not entirely agree that attention played a critical role in the timing perturbation under vestibular stimulation.

72 Do memory or cognitive processes intervene in our one second interval production task? Rammsayer and Lima (1991) questioned the critical interval of 2 sec proposed by Fraisse (1984) and showed that duration discrimination of 1 sec filled auditory intervals was cognitively mediated, since the performance was impaired by increasing the cognitive load. Moreover, one second is perhaps the duration the most learned during lifespan which means that the estimation of one sec could imply a memory component. However, it has been proposed in the Multiple Timer Model (Ivry & Richardson, 2002) that short durations (such as one second) could be tuned by some nervous network in the cerebellum.

73 The present study attempted to contribute to the idea of motion and time interdependence, and showed that temporal production is shortened and more variable under vestibular stimulation.

74 The finding that time perception may depend on vestibular processing could have severe consequences for vehicular travel in which time estimation is relevant information or for space exploration activities under microgravity where the otoliths reference is missing. The possible interaction between time and space in these fields of activity should be further explored.

Acknowledgements

75 This work was supported by the ACI project, France. The authors thank V. Pouthas (LENA, CNRS), G. Reymond (LPCMV, CNRS-Renault), J. Provasi (LPBD, EPHE), R. Bertin (INRETS) for their helpful scientific advice, P. Leboucher and M. Ehrette (LPPA, CNRS) for their technological help. All the volunteers are also gratefully acknowledged. Prof. A. Berthoz (head of the LPPA) is deeply thanked for allowing us using the LPPA corridor.

Citation

76 R Development Core Team (2006). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL http://www.R-project.org.

Bibliography

Barmack, N.H. (2003). Central vestibular system: vestibular nuclei and posterior cerebellum. *Brain Research Bulletin,* 60, 511-541.

Berthoz, A., Israël, I., Georges-François, P., Grasso, R., & Tsuzuku, T. (1995). Spatial memory of body linear displacement: What is being stored? *Science,* 269, 95-98.

Burle, B., & Bonnet, M. (1997). Further argument for the existence of a pacemaker in the human information processing system. *Acta Psychologica (Amst),* 97, 129-143.

Burle, B., & Casini, L. (2001). Dissociation between activation and attention effects in time estimation: implications for internal clock models. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance,* 27, 195-205.

Casini, L., & Macar, F. (1997). Effects of attention manipulation on judgments of duration and of intensity in the visual modality. *Memory and Cognition,* 25, 812-8.

Cohen, B., Henn, V., Raphan, T., & Dennett, D. (1981). Velocity storage, nystagmus, and visual-vestibular interactions in humans. *Annals of New York Academy of Science*, 374, 421-33.

Collier, G.L., & Ogden, R.T. (2001). Variance decomposition of tempo drift in isochronous rhythmic tapping. *Annals of New York Academy of Sciences.* 930, 405-408.

Collier, G.L., & Ogden, R.T. (2004). Adding drift to the decomposition of simple isochronous tapping: an extension of the Wing-Kristofferson model. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*. 30, 853-872.

Droit-Volet, S., & Wearden, J. (2002). Speeding up an internal clock in children? Effects of visual flicker on subjective duration. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, B. Comparative and physiological psychology,* 55, 193-211.

Fraisse, P. (1963). *The Psychology of Time*. New York: Harper & Row.

Fraisse, P. (1984). Perception and estimation of time. *Annual Review of Psychology*. 35, 1-36.

Frankenhaeuser, M. (1960). Subjective time as affected by gravitational stress. *Scandinavian Journal of Psychology*, I, 1-6.

Georges-François, P., Grasso, R., Berthoz, A., & Israël, I. (1995). Self-controlled reproduction of passive linear displacement: distance, duration and velocity. InHlavacka F & Mergner T. (Eds), *Multisensory control of posture and movement,* (pp.199-206). New York, London : Plenum Publishing.

Gerwig, M., Dimitrova, A., Kolb, F.P., Maschke, M., Brol, B., Kunnel, A., Boring, D., Thilmann, A.F., Forsting, M., Diener, H.C., & Timmann, D. (2003). Comparison of eyeblink conditioning in patients with superior and posterior inferior cerebellar lesions. *Brain*, 126, 71-94.

Gerwig, M., Hajjar, K., Dimitrova, A., Maschke, M., Kolb, F.P., Frings, M., Thilmann, A.F., Forsting, M., Diener, H.C., & Timmann, D. (2005). Timing of conditioned eyeblink responses is impaired in cerebellar patients. *Journal of Neuroscience.* 25, 3919-31.

Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review,* 84, 279-325.

Gibbon, J., & Church, R.M. (1990). Representation of time. *Cognition, 37*, 23-54.

Glasauer, S., Schneider, E., Grasso, R., & Ivanenko, Y.P. (2007). Space-time relativity in self-motion reproduction. *Journal of Neurophysiology.* 97, 451-61.

Guedry, F.E. (1974). Psychophysics of vestibular sensation. In HH Kornhuber (ed), *Handbook of Sensory Physiology; Vol. VI/2 (*pp 3-154).Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Hornstein, A.D., & Rotter, G.S. (1969). Research methodology in temporal perception. *Journal of Experimental Psychology*, 79, 561-564.

Israël, I., Chapuis, N., Glasauer, S., Charade, O., & Berthoz, A. (1993). Estimation of passive horizontal linear whole-body displacement in humans. *Journal of Neurophysiology*, 70, 1270-1273.

Israël, I., Capelli, A., Sablé, D., Laurent, C., Lecoq, C., & Bredin, J. (2004). Multifactorial interactions involved in linear self-transport distance estimate: a place for time. *International Journal of Psychophysiology*, 53, 21-28.

Ivry, R.B., & Keele, S.W. (1989). Timing functions of the cerebellum. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *1*, 136–152.

Ivry, R.B. (1996). The representation of temporal information in perception and motor control. *Current Opinion in Neurobiology*, *6*, 851–857.

Ivry, R.B., & Richardson T.C. (2002). Temporal Control and Coordination: The Multiple Timer Model. *Brain and Cognition*, 48, 117–132.

Ivry, R.B., & Spencer, RMC. (2004). The neural representation of time. *Current Opinion in Neurobiology*, 14, 225–232

Killeen, P.R., & Fetterman, J.G. (1988). A behavioral theory of timing. *Psychological Review,* 95, 274-95.

Fetterman, J.G., & Killeen, P.R. (1991). Adjusting the pacemaker. *Learning & Motivation*, 22, 226-252.

Lappe, M., Awater, H., & Krekelberg, B. (2000). Postsaccadic visual references generate presaccadic compression of space. *Nature*, 24, 892-5.

Lewis, P.A., & Miall, R.C. (2003). Brain activation patterns during measurement of

sub- and supra-second intervals. *Neuropsychologia*, 41, 1583–1592.

Loomis, J.M., Klatzky, R.L., & Golledge, R.G. (2001). Navigating without vision: basic and applied research. *Optometry and Vision Science,* 78, 282-289.

Macar, F., Grondin, S., & Casini, L. (1994). Controlled attention sharing influences time estimation. *Memory and Cognition*, *22*, 673–686.

Mangels, J.A., Ivry, R.B., & Shimizu, N. (1998). Dissociable contributions of the prefrontal and neocerebellar cortex to time perception. *Cognitive Brain Research,* 7, 15–39.

Mauk, M.D., & Buonomano, D.V. (2004). The neural basis of temporal processing. *Annual Review of Neuroscience,* 2, 307-40. Review.

Mittelstaedt, M.L., & Glasauer, S. (1991). Idiothetic navigation in gerbils and humans. *Zoologische Jahrbuch Physiologie,* 95, 427-435.

Mittelstaedt, M.L., & Mittelstaedt, H. (2001). Idiothetic navigation in humans: estimation of path length. *Experimental Brain Research,* 139, 318-332.

Morrone, M.C., Ross, J., & Burr, D., (2005). Saccadic eye movements cause compression of time as well as space. *Nature Neuroscience,* 8, 950-4.

Nichelli, P., Alway, D., & Grafman, J. (1996). Perceptual timing in cerebellar degeneration. *Neuropsychologia*, 34, 863-71.

Penton-Voak, I.S., Edwards, H., Percival, A., & Wearden, J.H. (1996). Speeding up an internal clock in humans? Effects of click trains on subjective duration. *Journal of Experimental Psychology*, *Animal Behavioural Processes,* 22, 307-320.

Perrett, S.P., Ruiz, B.P., Mauk, M.D. (1993). Cerebellar cortex lesions disrupt learning-dependent timing of conditioned eyelid responses. *Journal of Neuroscience,* 13, 1708-18.

Rammsayer, T.H., & Lima, S.D. (1991). Duration discrimination of filled and empty auditory intervals: cognitive and perceptual factors. *Perception and Psychophysics,* 50, 565-574.

Semjen, A., Leone, G., & Lipshits, M., (1998). Temporal control and motor control: two functional modules which may be influenced differently under microgravity. *Human Movement Science,* 17, 77-93.

Semjen, A., Leone, G., & Lipshits, M. (1998A). Motor timing under microgravity. *Acta Astronautica*, 42, 303-321.

Treisman, M., Faulkner, A., Naish, P.L., & Brogan, D. (1990). The internal clock: evidence for a temporal oscillator underlying time perception with some estimates of its characteristic frequency. *Perception,* 19, 705-743.

Vanneste, S., Pouthas, V., & Wearden, J.H. (2001). Temporal control of rhythmic performance: a comparison between young and old adults. *Experimental Aging Research,* 27, 83-102.

Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 483-8.

Wertheim, A.H., Mesland, B.S., & Bles, W. (2001). Cognitive suppression of tilt sensations during linear horizontal self-motion in the dark. *Perception,* 30, 733-741.

Wing, A.M., Kristofferson, A.B. (1973). Response delays and the timing of discrete motor responses. *Perception and Psychophysics,* 14, 5-12.

Young, L.R. (1984). Perception of the body in space : mechanisms. In I. Darian-Smith, (ed), *Handbook of Physiology - The nervous system III(* pp 1023-1066). American Physiological Society, Bethesda.

References

Electronic reference
Aurore Capelli, Renaud Deborne and Isabelle Israël, « Temporal Intervals Production During Passive Self-Motion in Darkness », *Current psychology letters* [Online], 22, Vol. 2, 2007 | 2007, online since 16 septembre 2007. URL : http://cpl.revues.org/index2672.html

Aurore Capelli
Laboratoire de Psychobiologie du Développement, EPHE, Paris, France & Laboratoire de Perception et Contrôle du Mouvement en environnement Virtuel immersif, Guyancourt, France.aurore.capelli@college-de-france.fr

Renaud Deborne
Laboratoire de Perception et Contrôle du Mouvement en environnement Virtuel immersif, CNRS-Renault,France

Isabelle Israël
Laboratoire de Psychobiologie du Développement, EPHE, Paris, France&Laboratoire de Perception et Contrôle du Mouvement en environnement Virtuel immersif, CNRS-Renault, France

Copyright

© All rights reserved

Résumé / Abstract

Des études précédentes (Israël, Chapuis, Glasauer, Charade, & Berthoz, 1993 ; Israël, Capelli, Sablé, Laurent, Lecoq, & Bredin, 2004) ont montré que le temps était utilisé lors de l'estimation de distances parcourues dans l'obscurité et que la distance était surestimée. La perception du temps est-elle modifiée lors de mouvement propre stimulant le système vestibulaire ?
Des participants les yeux bandés ont réalisé une tâche de production d'intervalles temporels de une seconde tandis qu'ils étaient passivement déplacés linéairement ou angulairement avec vitesse constante, variable, ou immobiles. Les résultats ont montré que la régularité des intervalles était altérée lors du mouvement propre comparé à l'immobilité. De plus, la production d'intervalles ralentissait pendant la décélération du mouvement et augmentait pendant l'accélération. Cet effet a été principalement attribué au système vestibulaire (et somatosensoriel).

Previous studies (Israël, Chapuis, Glasauer, Charade, & Berthoz, 1993 ; Israël, Capelli, Sablé, Laurent, Lecoq, & Bredin, 2004) showed that time was used in the estimation of a traveled distance in darkness and that the distance was overestimated. Is time estimation modified during self-motion? Blindfolded participants performed a temporal interval production task of one second while passively displaced linearly or angularly with constant or varying velocity, or immobile. The intervals regularity was impaired during self-motion compared to immobility. Furthermore the intervals rate was slowed during motion deceleration and increased during acceleration. This effect is mainly attributed to the vestibular (and somatosensory) system.

Keywords : self-motion, vestibular system, Time Perception

Modélisation de l'adaptation des conducteurs au comportement du véhicule et expérimentations sur simulateur

Résumé : Lorsqu'un conducteur prend en main un nouveau véhicule, celui-ci risque de présenter un comportement routier différent. Pour autant cela ne nécessite pas d'apprentissage particulier de la part du conducteur et il sera très rapidement capable de maîtriser ce véhicule. Cet acte anodin révèle une capacité propre aux systèmes biologiques qui s'étend pour l'être humain, bien au-delà du champ spécifique de la conduite automobile. En effet, nous sommes dans nos gestes quotidiens confrontés continuellement à un environnement changeant. Nos capacités d'apprendre confèrent à nos connaissances sur le monde et sur notre interaction avec celui-ci une plasticité qui se révèle essentielle. Mais ces capacités ne sont pas infinies et la détermination de leurs limites présente un réel défi pour les constructeurs automobiles qui proposent de plus en plus fréquemment des systèmes embarqués pouvant modifier le comportement dynamique du véhicule. Par ailleurs, l'étude de l'adaptation d'un conducteur à un comportement imprévisible du véhicule ou d'un de ses systèmes d'aide à la conduite peut se révéler complexe à mettre en place, coûteuse en instrumentation voire dangereuse. L'avènement des outils de simulation et de réalité virtuelle permet aujourd'hui de contourner certaines de ces limitations. Toutefois, la conduite d'expérimentations exhaustives quant aux types d'évènements possibles avec un nombre de sujets suffisamment important pour être pertinent en regard de la diversité des profils de conducteurs est impossible. L'utilisation de modèles, de comportement du conducteur est donc nécessaire. Cependant de tels modèles dotés de capacités adaptatives sont encore trop peu nombreux. De ce constat nous nous proposons dans cette étude d'établir un modèle de conducteur ayant la propriété de pouvoir intégrer des modifications de l'environnement. Plusieurs hypothèses existent sur la manière dont le système nerveux central peut réagir à de tels évènements. Nous identifions en particulier la stratégie de mise à jour de modèle interne et celle de modulation de l'impédance des membres. Nous intégrons au sein de notre modèle ces deux stratégies afin de lui conférer une certaine cohérence physiologique mais aussi pour en étudier les performances propres. Nous proposons alors une méthodologie pour l'étude de l'adaptation sensorimotrice des conducteurs que nous appliquons au cas de la conduite en virage. Nous établissons ainsi un nouveau modèle adaptatif de la tâche de conduite pour le contrôle latéral. Nous proposons également une calibration des différents paramètres de ce modèle. Nous réalisons alors deux expérimentations mettant en lumière les capacités d'adaptation des conducteurs. Puis, nous montrons de quelle manière notre modèle permet d'apporter des éléments de réponse sur les mécanismes responsables de cette adaptation. Enfin nous suggérons une application de aux études de sûreté de fonctionnement.

Mots clés : Réalité Virtuelle, Contrôle Sensorimoteur, Contrôle Adaptatif, Simulation de conduite, Sûreté de Fonctionnement, Modèle Interne, Modulation d'Impédance, Modélisation Conducteur, Adaptation.

Modeling driver adaptation to vehicle behavior changes, simulation studies

Abstract : Whenever a driver takes over a new vehicle, he is likely to experience a different road behavior of the car. However, this does not require any special training for the driver as he will be very prompt in controlling his vehicle. This usual action is evidencing a genuine capability which is specific to biological systems and, for any human being, expanding far beyond the particular application of automobile drive. As a matter of fact, we are constantly facing a changing environment in our daily motions. Our learning capabilities generate a unique adaptability which is key to our understanding of the world as well as our interaction with it. However, these capabilities are not infinite and their limit fixing constitutes a true challenge for car manufacturers who are more and more often offering embedded systems capable of modifying the dynamic behavior of the vehicle. Moreover, the survey on driver's adaptability to an unpredictable behavior of either the vehicle or its drive aided systems may turn out to be complex to implement, cost prohibitive in instrumentation or even hazardous. Today, the introduction of simulation and virtual reality tools allows to get rid of some of these limitations. However, the conduct of exhaustive experiments proves to be impossible considering the nature of possible events involving a large number of drivers to be meaningful and their inherent profile diversity. Utilization of driver behavior models becomes therefore an absolute necessary. It is worth notice that such models featured with adaptive capabilities are still far too few. Consequently, we are proposing in this survey to set up a driver model with the capability of integrating environmental changes. There are several hypotheses to explore as to the way the central nervous system is responding to such events. More specifically, we are analyzing the updating strategy of internal models and impedance modulation. Both strategies are being integrated into our model so as to make it more coherent physiologically and permit further evaluation of its inherent performances. Moreover, we are formulating a methodology for the study of sensorimotor driver's adaptability which we are using for turn driving application. In this way, we are setting up a new adaptive driving task model for lateral side application. We are also proposing this model with a calibration of its various parameters. Then, we are achieving two experiments evidencing adaptive driver's capabilities. Next, we are demonstrating how our model helps understanding this adaptation. Finally, we are developing a possible application to the in-operation safety surveys.

Keywords : Virtual Reality, Sensorimotor Control, Adaptive Control, Driving Simulation, Safety Reliability, Internal Model, Impedance Modulation, Driver Modeling, Adaptation.