



HAL
open science

Couplage visuo-haptique en environnement de conduite simulée

Slim Azzi

► **To cite this version:**

Slim Azzi. Couplage visuo-haptique en environnement de conduite simulée. Modélisation et simulation. Arts et Métiers ParisTech, 2012. Français. NNT : 2012ENAM0004 . pastel-00703769

HAL Id: pastel-00703769

<https://pastel.hal.science/pastel-00703769>

Submitted on 4 Jun 2012

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.

Abstract

Notre système visuo-haptique est sollicité dès que nous voulons interagir avec notre environnement extérieur, à l'aide de nos bras. Il existe un couplage entre la modalité visuelle et la modalité haptique, de sorte que le système nerveux central se base sur la fiabilité et la précision de chacune des deux modalités, afin de pondérer leurs influences dans l'intégration visuo-haptique. Il y a ainsi un rééquilibrage du poids de chaque modalité en fonction du contexte de sollicitation du système visuo-haptique.

Habituellement, les études psychophysiques mettent en œuvre des tâches, courtes et répétées, d'estimation de grandeur ou de comparaison, avec ou sans conflit sensoriel, pour comprendre les mécanismes qui régissent le couplage visuo-haptique. Dans notre contexte appliqué, cette méthode est exclue car nous devons conserver le caractère écologique de la conduite. Il a donc fallu trouver des indicateurs, représentatif de chaque tâche expérimentale, permettant de mesurer la performance des sujets.

Nous avons réalisé trois expérimentations au Centre Technique de Simulation : dans la première, une tâche d'assemblage virtuel avec un bras à retour d'effort, nous a permis d'identifier le seuil de gêne perçue en présence de délais visuo-haptiques. Dans une deuxième expérimentation, à l'aide d'une tâche d'éco-conduite assistée, nous avons comparé les performances de deux interfaces d'assistance du conducteur : l'une visuelle et l'autre haptique. Enfin, une tâche de conduite en slalom a servi de support à l'étude du comportement de notre système visuo-moteur lors de l'introduction de gains de démultiplication et de retour d'effort au volant.

Dans tous les cas, nous observons une forte plasticité du système nerveux central, capable, dans une certaine limite, de modifier le couplage visuo-haptique, pour s'adapter à un conflit, un bruit ou gain sur l'une ou l'autre des modalités. Il est également possible à travers ces études de percevoir la forte valeur ajoutée de la modalité haptique dans des applications liées à l'industrie automobile.

Plan de lecture

Ce travail est composé de trois grandes parties. La première partie (chapitres 1 et 2) expose les deux approches, scientifique et appliquée, que nous avons utilisées dans cette étude. Pour des questions de facilité de lecture, nous avons présenté dans la deuxième partie (chapitres 3 à 7) une synthèse bibliographique générale, pour comprendre les concepts manipulés dans ce manuscrit. Enfin, la troisième partie (chapitres 8 à 10) contient les expérimentations réalisées pendant la thèse. Chacune renferme un supplément bibliographique court et plus ciblé.

Dans l'état de l'art, le chapitre 3 présente les mécanismes de la perception visuelle. Le chapitre 4 fait de même pour la perception haptique. Le chapitre 5 traite les mécanismes de couplage entre modalité visuelle et modalité haptique. À partir de là, l'état de l'art devient plus appliqué. Le chapitre 6 aborde les mécanismes de perception et d'action du conducteur, tandis que le chapitre 7 recense les études portant sur les systèmes d'aide à la conduite.

Dans les expérimentations, le chapitre 8 est une évaluation d'interfaces visuelle et haptique d'assistance à l'éco-conduite. Enfin, le chapitre 9 étudie l'adaptation des conducteurs lors de l'introduction de gains de démultiplication et de retour d'effort au volant.

Pour finir, une synthèse permet d'avoir une vue d'ensemble des résultats obtenus à la fin de ces travaux.

Sommaire

Abstract	1
Plan de lecture	2
Sommaire	3

Partie 1

Contexte et approche

1	Approche scientifique	7
1.1	Sujet et problématique	7
1.2	Le laboratoire Le2i.....	8
2	Approche industrielle	9
2.1	Problématiques industrielles	9
2.1.1	Démultiplication de la direction du véhicule.....	9
2.1.2	Assistance à l'éco-conduite	9
2.2	Le centre Technique de Simulation (CTS) de Renault.....	9
2.2.1	Simulateurs statiques.....	10
2.2.2	Simulateurs dynamiques	11
2.3	Cadre administratif et projets	13
2.3.1	Projet IViMA	13
2.3.2	Projet ARiVA ²	15
2.3.3	Projet geDriver	16

Partie 2

Bibliographie

3	Modalité visuelle.....	19
3.1	Physiologie.....	19
3.1.1	L'œil.....	19
3.1.2	La rétine	19
3.1.3	Les voies visuelles.....	21
3.2	Mécanismes de la perception visuelle.....	21
3.2.1	Perception des tailles.....	21
3.2.2	Perception de la profondeur	22
4	Modalité haptique	27
4.1	Les récepteurs	27
4.1.1	Mécanorécepteurs cutanés.....	27
4.1.2	Récepteurs musculaires et articulaires.....	28
4.2	Résolution spatiale du toucher	30
4.3	Perception de la force : force absolue ou effort musculaire	31
4.4	Intégration haptico-proprioceptive : perception active	31
4.4.1	Perception des orientations : effet d'oblique	31
4.4.2	Perception de la courbure.....	32
4.4.3	Perception des longueurs.....	33

5	Intégration visuo-haptique	35
5.1	Evolution avec l'âge	35
5.2	Domination de la vision dans la perception du corps.....	35
5.3	Introduction à la méthode psychophysique	36
5.4	Perception des tailles.....	39
5.5	Perception de la raideur.....	41
5.6	Perception de la profondeur	44
5.7	Perception des orientations	46
5.8	Conclusion	49
6	Perception et action des conducteurs	51
6.1	Fonctionnement d'une assistance électrique au volant	51
6.2	Méthode du "tangent point" en conduite.....	51
6.3	Le contrôle moteur en conduite.....	54
6.3.1	Théorie des modèles internes	54
6.3.2	Boucle ouverte, boucle fermée	55
6.3.3	Stratégies d'adaptation sensorimotrice.....	56
6.4	Conclusion	59
7	Les systèmes embarqués	61
7.1	Généralités	61
7.2	Workload en conduite	62
7.2.1	Workload et expérience du conducteur	63
7.2.2	Workload et tâche secondaire.....	64
7.2.3	Workload et complexité du trafic	65
7.3	Interfaces visuelles d'assistance à la conduite	65
7.4	Interfaces haptiques d'assistance à la conduite.....	67
7.4.1	Généralités : perception haptique du pied	67
7.4.2	Application au suivi de véhicules.....	67
7.4.3	Application à la limitation de vitesse	69

Partie 3

Expérimentations

8	Comparaison d'assistance visuelle et haptique à l'éco-conduite.....	73
8.1	Objectifs.....	73
8.2	Bibliographie.....	73
8.2.1	Assistance par retour visuel.....	73
8.2.2	Assistance par retour haptique	74
8.2.3	Assistance à l'éco-conduite.....	74
8.3	Dispositif expérimental	78
8.3.1	Le simulateur CARDS	78
8.3.2	Loi d'éco-conduite	79
8.3.3	La pédale d'accélérateur à retour d'effort.....	80
8.4	Protocole	81
8.4.1	Tâche expérimentale	81
8.4.2	Participants	81
8.4.3	Conditions	82
8.4.4	Données calculées	82
8.5	Résultats.....	83
8.6	Discussion.....	84
8.6.1	Apport des consignes à l'éco-performance	85
8.6.2	Apport supplémentaire des systèmes d'aide à l'éco-conduite	85
8.6.3	Apports de la pédale haptique	86
8.6.4	Intégration visuo-haptique.....	89
8.7	Conclusion et perspectives.....	89

9	Couplage visuo-haptique au volant.....	91
9.1	Objectifs.....	91
9.2	Bibliographie.....	91
9.2.1	Direction à démultiplication variable.....	91
9.2.2	Adaptation sensorimotrice.....	92
9.3	Dispositif expérimental.....	93
9.4	Tâche expérimentale.....	94
9.5	Protocole.....	94
9.6	Résultats.....	95
9.7	Discussion.....	96
9.7.1	Analyse qualitative.....	96
9.7.2	Rééquilibrage des modalités : visuelle et haptique.....	98
9.7.3	Adaptation sensorimotrice aux gains de démultiplication et de couple.....	99
9.7.4	Adaptation consciente ou inconsciente ?.....	101
9.8	Conclusion et perspectives.....	102
	Synthèse et perspectives.....	105
	Références bibliographiques.....	107
	Annexes - articles rédigés.....	114
	Annexes – Résultats bruts.....	140

Partie 1

Contexte et approche

1 Approche scientifique

1.1 Sujet et problématique

Cette thèse aborde le sujet du "couplage visuo-haptique en environnement de conduite simulée". Nous avons essayé d'étudier la nature de ce couplage dans trois différents contextes de sollicitation du système visuo-haptique.

D'après la littérature, nous savons que c'est la confiance accordée à une modalité, dans un contexte donné, qui définit son poids dans l'intégration multi-sensorielle. Dans nos travaux, le couplage visuo-haptique définirait ainsi les lois qui régissent la pondération dynamique des modalités visuelle et haptique, en fonction du contexte de nos expérimentations.

Même si les tâches expérimentales choisies dans ces travaux relèvent de problématiques liées à la conduite, l'approche académique a cela de bénéfique qu'elle permet d'interpréter nos résultats à la lumière de recherches menées sur des tâches fondamentales qui s'en rapprochent. En effet, nous avons adopté un angle scientifique pour chercher à comprendre si la modification du couplage visuo-haptique au volant peut influencer le processus d'adaptation visuo-motrice d'un conducteur. Nous avons également tenté de savoir s'il est judicieux d'utiliser le canal haptique pour transmettre des informations aux conducteurs. À part pour le volant, il est vrai que les interfaces haptique sont sous-utilisées dans l'habitacle des véhicules. Au delà de cet attrait pour la nouveauté de l'haptique en automobile, nous cherchons à savoir plus généralement laquelle des deux modalités, visuelle ou haptique, est la plus "disponible", dans le contexte précis de la conduite, pour effectuer une tâche secondaire liée à un système d'information du conducteur.

Habituellement, pour étudier le couplage visuo-haptique, l'approche psychophysique utilise des tâches basiques, courtes et répétées. De plus, la méthode du conflit sensoriel est souvent employée pour mettre en évidence le poids respectif de chaque modalité. On peut distinguer : les conflits spatiaux, qui résultent de l'application d'une translation ou d'une rotation entre les référentiels spatiaux de plusieurs modalités ; les conflits temporels, qui résultent de l'application d'un délai entre la restitution des signaux des différentes modalités ; les conflits par dégradation de modalité, qui résultent de l'introduction d'un bruit sur l'une des modalités.

Afin d'analyser le comportement des conducteurs, en préservant ce que (*De Gelder & Bertelson, 2003*) appellent : la validité écologique de notre étude, la solution que nous nous sommes efforcés de mettre en œuvre s'appuie sur une approche consistant à mesurer la performance des sujets sur la base d'une sélection d'indicateurs, qui seraient des mesures représentatives de la tâche à accomplir. L'objet de notre étude étant appliqué à une problématique de conduite, nous ne pouvons nous contenter de généraliser les résultats d'un protocole fondamental à l'ensemble des situations de conduite. Nous devons nous placer dans un contexte de conduite écologique, sans possibilité de soumettre les sujets à une répétition de tâches courtes, ce qui élimine les options de conflits visuo-haptiques dans l'étude de ce couplage en situation de conduite simulée.

1.2 Le laboratoire Le2i

Le *Le2i* (Laboratoire d'Electronique et d'Informatique de l'Image) est une UMR (Unité Mixte de Recherche) de l'université de Bourgogne, Arts et Métiers ParisTech et le CNRS. Ce laboratoire est composé de 130 personnes, réparties sur différents sites dans la région Bourgignonne.

Cette thèse s'inscrit dans les thèmes de recherche de l'équipe, basée à l'Institut Image de Chalon sur Saône, et dirigée par le Professeur Frédéric Mérienne, directeur scientifique de la thèse. Les domaines d'expertise de ce centre sont la simulation et la réalité virtuelle. Cet outil puissant, si tant est que l'immersion virtuelle soit réussie, est utilisé pour étudier les interactions multi-sensorielles humaines d'un côté et concevoir des simulateurs répondants à des besoins industriels de l'autre.

Parmi les principaux moyens techniques de l'Institut Image :

- Le simulateur de conduite SAM (*Figure 1*) a été conçu autour d'une Twingo modifiée. C'est un simulateur dynamique, monté sur une plate-forme 6 axes, avec un écran courbe et des projecteurs embarqués. Pour le reste, les commandes du véhicule sont des équipements de série de la Twingo, ce qui renforce la sensation d'immersion virtuelle. Ce projet, mené par Florent Colombet, a été réalisé avec l'aide de Renault.
- La salle immersive MoVe (*Figure 1*) permet une interaction de l'utilisateur avec l'environnement virtuel. Les mouvements de la tête étant tracés, l'utilisateur peut balayer la scène visuelle, les images stéréoscopiques sont mises à jour en temps réel. Cette technique permet une immersion inégalée dans une scène virtuelle.



Figure 1 : A gauche, aperçu de l'intérieur du simulateur SAM. Sur cette photo, on peut s'apercevoir de la qualité immersive du simulateur. A droite, aperçu du cube immersif MoVe. L'utilisateur, chaussé de lunettes stéréoscopiques actives, voit les images qui l'entourent en 3D.

2 Approche industrielle

2.1 Problématiques industrielles

2.1.1 Démultiplication de la direction du véhicule

Nous cherchons ici à évaluer l'impact d'un changement de démultiplication et d'assistance au volant. Dans une tâche de slalom, nous avons mesuré la capacité des sujets à contrôler la trajectoire du véhicule lorsqu'ils sont soumis à une modification de la démultiplication volant / roues, de l'effort ressenti par le conducteur au volant, ou les deux à la fois avec des gains identiques. Le but est de comprendre les mécanismes d'adaptation visuo-motrice en conduite. Les indices visuels sont donnés par la vitesse de lacet, perçue à l'aide du flux visuel ; tandis que les indices haptiques sont transmis au conducteur par l'intermédiaire du retour d'effort au volant. Outre la compréhension des mécanismes perceptifs croisés entre vision et haptique, le but appliqué de cette expérimentation consiste à savoir comment faire évoluer l'assistance de couple au volant, lorsqu'on modifie la démultiplication de la direction.

2.1.2 Assistance à l'éco-conduite

Dans une expérimentation utilisant une pédale d'accélérateur à retour d'effort, nous avons voulu confirmer ou infirmer la pertinence de la modalité haptique dans les applications d'éco-conduite. Les interfaces visuelles, étant déjà répandues dans le milieu automobile, nous avons des raisons de penser que l'adjonction d'une information haptique serait en mesure d'améliorer l'éco-performance des conducteurs. De plus, le retour d'effort étant transmis par la pédale d'accélérateur, organe de commande du véhicule, nous avons cherché à évaluer la réaction des conducteurs lors d'une première utilisation de la pédale à retour d'effort.

2.2 Le centre Technique de Simulation (CTS) de Renault

Dans l'industrie automobile, la simulation a permis de raccourcir le cycle de conception d'un nouveau véhicule à une durée inférieure à 24 mois, en remplaçant les étapes de prototypage physique par le calcul ou la visualisation 3D. En outre, ces nouvelles méthodes étant moins coûteuses, les sommes engagées dans la conception des véhicules s'en trouvent moins élevées, ce qui permet de répercuter cette baisse sur les prix de vente.

Cette réduction du délai de conception s'accompagne d'une montée en puissance des systèmes embarqués dans tous les véhicules, permettant d'en améliorer la sécurité, le confort, et la tenue de route. C'est aussi grâce à la simulation que l'industrie automobile parvient à développer des véhicules conformes aux normes imposées par

l'administration européenne en matière de sécurité, d'émissions polluantes et acoustiques.

Le CTS est situé au Technocentre Renault (Guyancourt), il dispose de nombreux outils de réalité virtuelle régulièrement utilisés à différentes phases des projets de conception véhicule. Le CTS est chargé de développer des outils spécifiques pour les différents clients métiers au sein de Renault : conception, calcul, ergonomie, qualité, communication, ce service peut intervenir de façon transversale pour répondre aux besoins de métiers très variés dans l'entreprise. Dans le cadre de cette thèse CIFRE, le directeur industriel de la thèse, le Professeur Andras Kemeny, est également le responsable du CTS.

2.2.1 Simulateurs statiques

Simulateur d'éclairage

Le simulateur d'éclairage (*Figure 3*) permet de reproduire grâce à 3 projecteurs, sur un écran courbe à 210° (très large champ de vision), un faisceau d'optique véhicule réaliste en situation de conduite, afin de valider la visibilité de la route lors d'une conduite de nuit. Chez Renault, ce simulateur a permis de supprimer totalement le prototypage physique des optiques, dont le développement est passé au "tout numérique". Il permet également de se placer dans une situation de conduite de jour en offrant la possibilité d'avoir une vision en stéréoscopie active.



Figure 2 : Aperçu du simulateur éclairage du CTS Renault. A gauche un aperçu d'une conduite de nuit. On peut voir le faisceau lumineux projeté par les optiques du véhicule. A droite, un aperçu d'une conduite de jour permet de se rendre compte de la qualité de l'immersion grâce au champ de vision très large.

Postes de conduite

Le CTS dispose de deux simulateurs sous la forme de postes de conduite simples. Ces simulateurs moins immersifs permettent de libérer les simulateurs dynamiques pendant les phases de mise au point du projet. Il suffit ensuite de porter les évolutions de modèles ou les scénarii de conduite réalisés sur un autre simulateur pour pouvoir l'utiliser instantanément. Par ailleurs, chaque collaborateur a la possibilité d'installer l'application SCANeR sur son poste de travail afin de réaliser des tests suite à un développement.

2.2.2 Simulateurs dynamiques

Ultimate

Le simulateur *Ultimate* (*Figure 4*) permet de restituer des sensations de conduite échelle 1. Il est composé d'un cockpit de *Laguna III*, entièrement instrumenté, et d'un écran courbe, positionnés sur hexapode. Le tout est monté sur des rails longitudinaux et transversaux au véhicule d'une longueur de 7 mètres, afin de restituer l'ensemble des inclinaisons de la caisse et des accélérations longitudinales et latérales. Ce simulateur est essentiellement utilisé pour valider les systèmes d'aide à la conduite et analyser les comportements du conducteur.



Figure 3 : Aperçu du simulateur *Ultimate* du CTS Renault. On distingue les rails, ainsi que l'hexapode et l'écran cylindrique derrière lequel se trouve le cockpit du véhicule. Derrière la partie vitrée en hauteur se trouve le poste de commande du simulateur

Cards

Le simulateur *Cards* (*Figure 5*) est composé d'un cockpit de Mégane, entièrement instrumenté, monté sur un hexapode. 3 projecteurs assurent un visuel à large champ de vision à l'utilisateur. Le cockpit est équipé de caméras et d'autres systèmes de mesure pour enregistrer le comportement de l'utilisateur pendant la session de conduite. Ce simulateur convient parfaitement pour la validation des aspects ergonomiques de la conduite.



Figure 4 : Aperçu du simulateur *Cards* du CTS Renault. On distingue le cockpit, ainsi que l'écran triptyque pour la visualisation de la route. L'utilisateur peut chausser un casque de réalité virtuelle, qui se substitue à l'affichage sur écran.

2.3 Cadre administratif et projets

2.3.1 Projet IViMA

Objectifs

IViMA (Interactive Virtual Mockup Assembly) est le projet européen Eureka Σ!3178. Eureka¹ est un réseau intergouvernemental lancé en 1985 pour promouvoir le secteur de la R&D appliquée, les projets industriels innovants, les centres de recherche et les universités. Le réseau Eureka regroupe la plupart des pays européens, ainsi que la commission européenne.

Le projet auquel nous prenons part consiste à développer un simulateur qui permet de réaliser des opérations de montage/démontage virtuel pour l'industrie automobile, à l'aide d'un retour d'information visuel et haptique de la tâche virtuelle réalisée.

Trois besoins sont couverts par le projet IViMA :

- Le processus produit : validation de procédures d'assemblage et la détection de problèmes d'assemblage pendant les premières étapes d'un projet véhicule en évitant d'avoir recours à un prototype physique ; la découverte de problèmes tels qu'une position inconfortable, un assemblage difficile ou impossible, ou des contacts dangereux pour l'opérateur.
- La formation d'opérateurs : standardisation du processus sur tous les sites de production et tous les produits. Optimisation du geste de l'opérateur pour améliorer la cadence, la sécurité et l'ergonomie.
- La maintenance : création d'une base de données de maintenance pour informer et assister les opérateurs dans les ateliers de réparation.

Ces besoins ne peuvent pas être couverts par les outils actuellement utilisés dans les entreprises automobiles pour simuler l'assemblage sur des maquettes virtuelles. Les outils actuels manquent d'une interface interactive : les trajectoires sont calculées puis rejouées.

Il existe également un besoin pour la simulation des corps souples. Beaucoup de difficultés d'assemblage, dans l'industrie, sont liés à l'utilisation de matériaux souples, comme les câbles, la tuyauterie semi-rigide, la mousse d'isolation ou autres. Un outil qui peut simuler de tels matériaux est donc un plus.

¹ www.eureka.be

Description

IViMA est un projet européen lancé en 2004. Il s'agit d'une application virtuelle immersive qui peut simuler des tâches d'assemblage complexes. Le projet s'est terminé fin 2006.

Cet outil propose les fonctionnalités suivantes :

- La possibilité pour 2 utilisateurs de travailler simultanément sur une opération d'assemblage avec une vision stéréo à l'échelle 1 d'un modèle virtuel.
- Interaction avec le modèle à l'aide d'un bras à retour d'effort à 6 degrés de liberté. Ce dispositif permet aussi d'enregistrer et de rejouer la trajectoire.
- Détection de collision et simulation dynamique, incluant un phénomène complexe tel que la friction ou des effets coulissants.
- Simulation de collision de corps souples et déformation.
- Importation directe de modèles de CatiaV5.

Partenaires

Le projet réunit des équipes de recherche provenant de laboratoires et de sociétés à travers l'Europe, le Centre Technique de Simulation est chef de projet au sein de ce partenariat.

Les partenaires du projet :

- *Renault* fournit les conditions d'application du projet. Le CTS s'occupe de l'intégration de l'application du moteur physique, livré par les partenaires, et du dispositif à retour d'effort.
- *Barco* fournit un système de visualisation compact capable de produire une vision stéréo immersive pour deux utilisateurs simultanément.
- *Kaletron* met en œuvre un moteur pour la simulation physique de corps souples et intègre un outil d'engrènement 3D.
- *Oktal* met en œuvre l'importation de CAO/CAM et des outils de réduction ainsi que la configuration et les pièces d'édition de logiciel pour le matériau physique.
- *CNRS* (LPCMV - UMR 2858) valide scientifiquement la pertinence de l'utilisation de ce simulateur d'assemblage automobile.

2.3.2 Projet ARiVA²

Objectifs

Le projet ARiVA² a pour objectif de définir et de développer un logiciel intégré, ainsi qu'un système générique de réalité augmentée, pour des applications industrielles d'architecture véhicule. ARiVA² est un projet collaboratif européen reconnu par l'organisation Eureka sous la référence Σ!4000. Il a débuté en juin 2008, pour une durée de trois ans. Ce projet regroupe des partenaires dans les domaines de la recherche et de l'industrie. Les membres de ce consortium ont en commun un savoir faire dans le développement des solutions innovantes pour l'industrie dans les domaines de la réalité virtuelle et augmentée.

Les principaux objectifs sont :

- Etudier les technologies récemment développées dans le domaine de la visualisation d'images 3D à l'aide de systèmes holographiques en temps réel.
- Développer des outils innovants, utilisant la réalité augmentée, avec incrustation d'images réelles et virtuelles du véhicule. En particulier grâce à l'utilisation de casques « see through » dans un simulateur de conduite.

Description

Le projet ARiVA² a suivi un processus de développement et de validation propre aux technologies de réalité virtuelle : software et hardware. On peut y distinguer les étapes suivantes :

- Développement et industrialisation d'un casque de réalité virtuelle à large champ de vision, et d'un système d'affichage holographique.
- Choix d'une architecture software et hardware adaptée aux applications de réalité augmentée pour l'industrie.
- Procédure de validation propre aux applications industrielles.
- Étude de l'observation et de l'exploration des utilisateurs en environnement virtuel.

Partenaires

Le consortium est composé de 6 partenaires, originaires de 4 pays différents. On compte 4 acteurs dans le domaine high-tech, un partenaire industriel et un institut public de recherche :

- *Renault* contribue au projet en apportant des connaissances en simulation de conduite et en réalité virtuelle, ainsi que leur application aux études d'ergonomie au sein du groupe.
- *Holographika* est chargé du développement d'un système d'affichage holographique à large champ de vision.
- *Oktal* est chargé des développements software et de leur intégration. Cette action comprend le développement du plug-in de réalité augmentée et le développement d'un outil de création de scénarios pour l'architecture véhicule.
- *STT* assure l'adaptation d'un système de tracking de mouvement de haute précision au casque de réalité virtuelle et aux mouvements du corps. Un outil d'analyse ergonomique permet également d'interpoler les mouvements du corps lors de l'occlusion des marqueurs de tracking.
- *Kaletron* travaille également sur les développements software. On peut citer entre-autres : les bases de données et scénarios de mise en situation pour l'architecture véhicule, ainsi que les effets spéciaux graphiques tels que les ombres ou la visibilité dégradée.
- *Le2i* étudie les indices de vision stéréoscopique et de parallaxe. Il est également chargé de la comparaison des quatre dispositifs d'affichage immersif à notre disposition pour le projet : cave, casque, système holographique et écran cylindrique.

2.3.3 Projet geDriver

Objectifs

La finalité du projet geDriver (Green and Efficient Driver) est de développer et de valider un simulateur d'entraînement à l'éco-conduite. Ce projet a été lancé par le pôle de compétitivité de la région Ile de France Systematic.

Les principaux objectifs sont :

- Fournir des modèles conducteurs permettant d'analyser les comportements d'éco-conduite, afin de les prendre en compte dans les entraînements.
- Renforcer l'attractivité de l'expérience d'éco-conduite par la simulation, pour inciter les conducteurs à adopter ce comportement. Pour cela, le projet empruntera des techniques de jeux vidéo afin d'améliorer la qualité des graphismes.
- Enrichir les connaissances existantes sur les champs de validité des simulateurs de conduite.

Description

Ce projet s'appuie sur une précédente tentative de conception d'un simulateur d'éco-conduite par Oktal, pour le compte du constructeur Renault. À terme, le simulateur du projet geDriver bénéficiera de la même structure que le simulateur Eco² précédemment développé. À cela s'ajoutent plusieurs fonctionnalités orientées vers des préoccupations d'apprentissage :

- Des scénarii d'éco-conduite enrichis, qui gèrent le trafic des véhicules, ainsi que la scénarisation pédagogique des étapes d'entraînement, accompagnée d'un retour d'expérience sur l'éco-performance réalisée.
- Des dispositifs visuels et auditifs d'assistance à l'éco-conduite pour améliorer l'éco-performance des conducteurs
- Des données de consommation issues de conduites sur véhicule réel, permettent de renforcer la validité de la simulation

Partenaires

Le projet a réuni divers partenaires. On compte 3 partenaires industriels et 2 instituts publics de recherche :

- *Oktal* est leader du projet geDriver. Il se charge de fournir le simulateur, ainsi que le logiciel de simulation SCANer et les scénarii d'éco-conduite.
- *Renault* fournit des préconisations sur l'évaluation des systèmes d'aide à l'éco-conduite. Dans ce domaine, cette thèse a contribué à la tâche qui incombe au constructeur.
- *Le2i - LEAD* se chargent de la validation scientifique du simulateur. Leur rôle est également de comparer l'efficacité des interfaces visuelle et sonore d'assistance à l'éco-conduite.
- *KDC* est spécialisé dans l'enregistrement de données sur véhicule roulant. Son objectif est d'identifier des profils types de roulage, de sorte que l'éco-performance soit optimale.

Partie 2

Bibliographie

3 Modalité visuelle

3.1 Physiologie

3.1.1 L'œil

Pour percevoir visuellement un objet de notre environnement, il faut qu'un rayon lumineux émis ou réfléchi par cet objet soit reçu par l'œil. Celui-ci est essentiellement composé d'humeur vitrée, on y distingue notamment, la cornée, membrane transparente extérieure de l'œil ; la pupille, qui sert à diaphragmer les rayons lumineux qui sont collectés par l'œil ; et le cristallin, faisant office de lentille, qui focalise les rayons lumineux sur la rétine. La courbure du cristallin, donc sa focale, peut varier pour accommoder à la profondeur désirée (*Figure 6*).

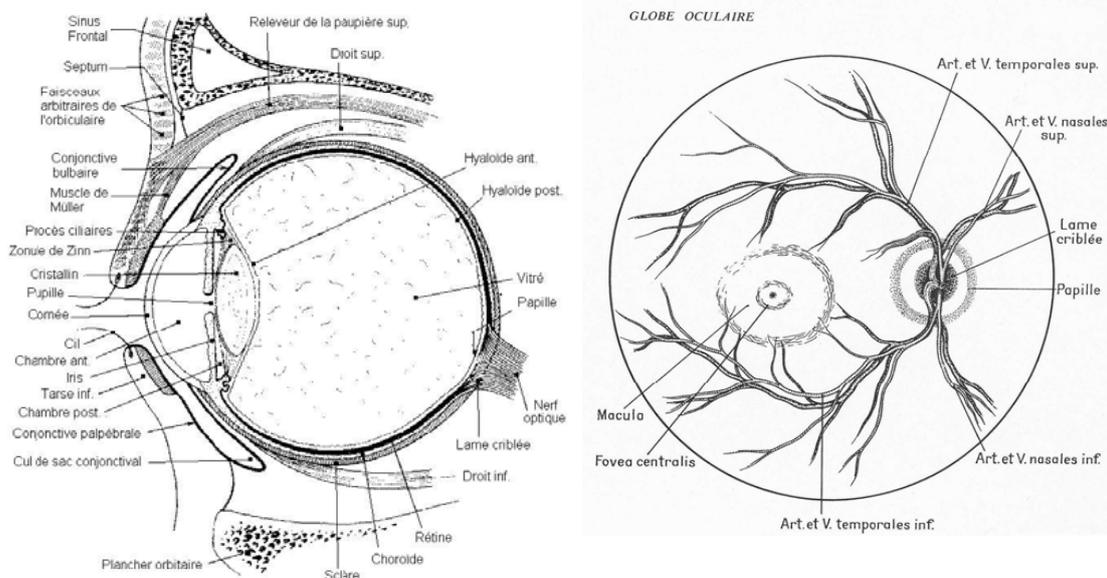


Figure 5 : A gauche : coupe verticale de l'œil. A droite : fond de l'œil. (Legent & al, 1976)

3.1.2 La rétine

La rétine (*Figure 7*) est une membrane nerveuse qui tapisse le fond de l'œil. On peut distinguer dans la composition de ses feuillets plusieurs couches de cellules dont les fonctions sont variées et complémentaires. À travers cette membrane, les rayons lumineux sont transformés en messages nerveux qui, à terme transiteront par le nerf optique. Le feuillet postérieur, également appelé épithélium pigmentaire a pour rôle de réfléchir la lumière à la manière d'un écran. Dans le feuillet antérieur, on distingue une première couche composée de cellules sensorielles, réceptrices des stimuli lumineux : les cônes et les bâtonnets.

Les bâtonnets contiennent une substance chimique, qui génère un faible courant électrique lorsqu'elle reçoit de la lumière : la rhodopsine. Ils sont absents de la fovéa et se logent à la périphérie de la rétine. Ils ont une grande sensibilité à la lumière, d'où leur rôle important en vision nocturne. Par contre, ils ont une très faible perception des détails et des couleurs, car plusieurs dizaines de bâtonnets sont connectés à une seule fibre du nerf optique, ce qui réduit la capacité d'informations nerveuses transmises.

Les cônes se logent dans la fovéa. Leur sensibilité à la lumière est très faible, ce qui cantonne leur utilisation à une vision diurne. À l'inverse, leur perception des détails est très grande pour deux raisons : leur densité est très élevée dans la fovéa et chaque cône transmet son information à plusieurs fibres du nerf optique. Les cônes ont également une bonne sensibilité aux couleurs. Selon le pigment qu'ils contiennent, ils sont sensibles à des longueurs d'onde particulières : les cônes contenant de l'erythropsine sont sensibles à la lumière rouge ; ceux contenant de la chloropsine au vert ; et ceux renfermant de la cyanopsine au bleu.

Après conversion des signaux lumineux en signaux électriques par les photorécepteurs (cônes et bâtonnets), l'information transite vers les cellules bipolaires, puis les cellules ganglionnaires dont les axones, particulièrement longs, constituent le nerf optique.

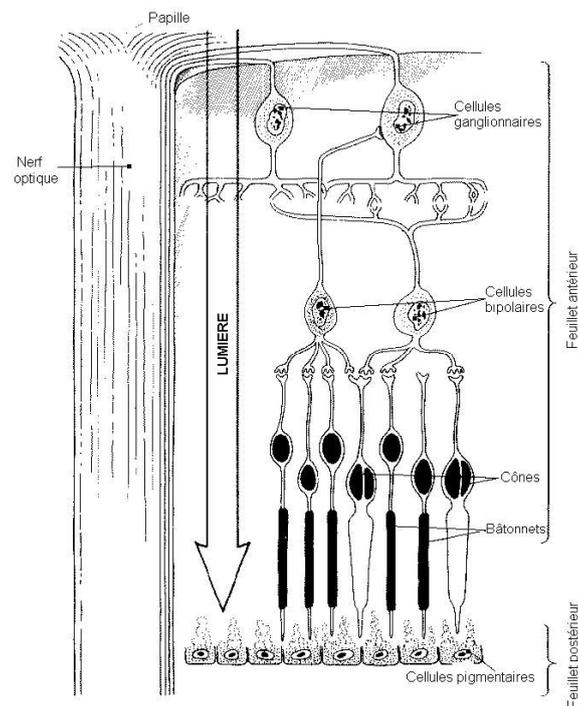


Figure 6 : Couches cellulaires de la rétine : couche pigmentaire, photorécepteurs et neurones rétiniens.

3.1.3 Les voies visuelles

Les signaux lumineux, ainsi perçus par 137 millions de photorécepteurs, sont véhiculés vers le nerf optique par seulement 1,5 millions de cellules ganglionnaires. Les réseaux de neurones rétiniens assurent donc la compression des données visuelles. Le nerf optique rejoint l'œil au niveau de la papille, zone dénuée de photorécepteurs, également appelée tâche aveugle. Les nerfs optiques des deux yeux se rejoignent au niveau du chiasma optique où la moitié des fibres de chaque œil rejoint les fibres restantes du côté opposé.

Après cette étape, 20% des fibres suivront la voie ventrale vers le colliculus supérieur, elles joueront un rôle lorsque la perception visuelle implique une accommodation ou des mouvements oculomoteurs, tandis que 80% des fibres suivront la voie dorsale en se dirigeant vers le corps genouillé latéral. Après transition par ce relais, les informations visuelles sont véhiculées vers des zones du cortex situées à l'arrière des lobes occipitaux : les aires visuelles (*Figure 8*).

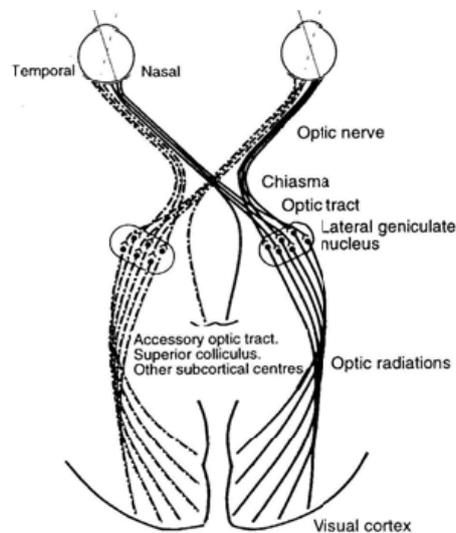


Figure 7 : Projection des champs visuels sur les aires corticales en passant par le chiasma optique et le corps genouillé latéral

3.2 Mécanismes de la perception visuelle

3.2.1 Perception des tailles

Taille relative

L'indice de taille relative est étroitement corrélé à l'indice de perspective. Étant donné que la perspective converge vers un ou plusieurs points de fuite positionnés sur la ligne d'horizon, donc à une distance visuelle assimilée à l'infini, la taille des objets observés sera perçue relativement plus petite lorsque la profondeur de l'objet

augmente. Ainsi, par simple analyse de la taille de l'objet, il est possible de situer sa position en profondeur (*Figure 9*).

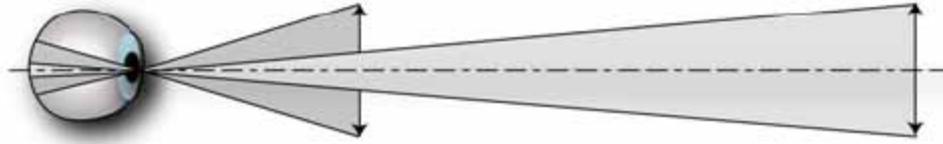


Figure 8 : Plus l'objet est loin de l'œil, plus sa taille angulaire sera petit, plus la dimension de sa projection sur la rétine sera petite.

Phénomène de constance de taille

La perception des tailles fait également intervenir un traitement cognitif de l'information visuelle. Lorsque l'objet observé est familier et ses dimensions connues par l'observateur, peu importe sa distance et sa taille angulaire, celui-ci sera perçu de taille constante quelle que soit sa profondeur. L'observateur prendra conscience de la distance d'observation, mais la taille de l'objet ne lui semblera pas différente. La dimension familière de l'objet domine la perception de sa dimension par l'indice de taille relative. Ainsi, pour apprécier visuellement la taille des objets, il semble qu'il existe en permanence un compromis entre le traitement perceptif, préféré pour des objets de taille angulaire petite, et le traitement cognitif, plus performant pour des angles visuels plus grands.

3.2.2 Perception de la profondeur

Informations binoculaires

Convergence

La convergence est le mécanisme de rotation des yeux, grâce aux muscles oculomoteurs, pour s'orienter vers la cible à observer. D'après (*Cutting & Vishton, 1995*), au-delà de 6 mètres, l'angle de vergence est trop petit pour être utilisé comme indice de distance. Plus restrictif, (*Gogel, 1961*) démontre que la vergence contribue à la perception des distances, lorsque celles-ci sont inférieures à la longueur du bras. Entre ces deux extrêmes, (*Richards & Miller, 1969 ; Von Hofsten, 1976*) confirment l'influence de la vergence dans la perception des distances jusqu'à 2 mètres. Dans tous les cas, le poids de cet indice reste relativement faible. Il baisse lorsque l'indice de vergence est combiné avec d'autres indices de perception de distance : en particulier, la diversité des indices exclusivement visuels fait baisser le poids de la vergence, de même que l'augmentation des conflits entre la vergence et les autres indices visuels. Pour finir, l'augmentation de la distance de fixation tend à réduire le poids de la vergence.

Accommodation

L'accommodation définit le mécanisme de mise au point de la projection de l'objet observé sur la rétine. Les objets alentours qui ne sont pas à la même profondeur apparaissent alors flous. Pour accommoder, le rôle des muscles ciliaires est primordial : ils agissent sur le cristallin en faisant varier sa courbure, donc sa focale, afin d'obtenir une projection nette sur la rétine. L'accommodation est couplée entre les deux yeux de l'observateur. On observe une variation de l'effort d'accommodation en fonction de la distance d'observation. D'après (*Fisher & Ciuffreda, 1988*), l'accommodation atteint sa limite d'efficacité lorsque la distance de l'objet observé est inférieure à 2 mètres. De plus, cet indice ne permet pas d'appréhender la distance relative des objets, dans la mesure où les objets positionnés plus loin et plus proches de la distance d'accommodation sont identiquement flous. Il n'est donc pas possible de comparer la distance relative de ces objets à la distance focale sur la base unique de l'indice d'accommodation.

Lien entre convergence et accommodation

Lorsqu'un observateur regarde un point proche, puis un point éloigné, les indices de convergence, d'accommodation et la taille de la pupille varient. L'angle de vergence et la courbure du cristallin diminuent. La pupille, elle, se dilate. À l'inverse, lorsqu'un observateur regarde d'abord le point éloigné avant le point proche, on observe un comportement inverse du triptyque accommodation-convergence-taille de la pupille. Le couplage des informations apportées par l'accommodation et la convergence permet une perception fiable des distances proches (*Mon-Williams & Tresilian, 1999*). Cependant, cette association d'informations n'est efficace qu'à des distances inférieures à 3 mètres (*Leibowitz & al, 1972 ; Kersten & Legge, 1983*).

Disparité binoculaire

La disparité binoculaire est la différence de position des projections d'un même objet, sur chacune des deux rétines (*Figure 10*). Elle dépend de l'écart inter-pupillaire, en moyenne de 6 cm chez l'adulte, qui définit la différence entre les positions d'observation des yeux. Cette disparité est interprétée pour percevoir la profondeur des objets. C'est l'indice le plus important dans la perception des profondeurs moyennes. Dans le cortex visuel, certains neurones reçoivent des afférences binoculaires. La vision stéréoscopique ou stéréopsie est le mécanisme qui permet au système visuel de transformer les disparités en profondeurs perçues. Il est à la base de la reconstruction de la vision en 3D, à partir de la vision 2D issue de la projection rétinienne. L'estimation de la profondeur entre deux objets en vision binoculaire est due en majorité à la disparité horizontale, celle-ci nécessite une convergence des yeux pour fixer l'objet.

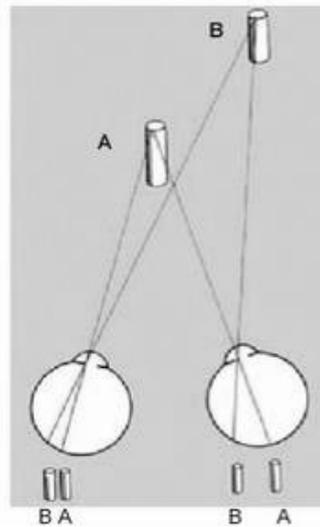


Figure 9 : Il existe une relation directe entre l'angle de vergence, séparant un objet A d'un objet B, et la disparité des projections rétiniennes de ces deux objets.

Stéréopsie

La stéréopsie est le mécanisme qui consiste à interpréter la disparité rétinienne, résultante de la fixation d'un objet, pour en déterminer la profondeur. Dans un champ visuel proche, cet indice reconstitue le relief de la scène visuelle qui permet une réponse motrice fine. Mais plus les distances sont grande, plus on se rapproche d'une distance assimilée visuellement à l'infini, moins la vision stéréoscopique est pertinent. Les axes oculaires étant quasi parallèles, les deux images rétiniennes deviennent identiques. (*Cutting & Vishton, 1995*) montrent que l'indice stéréoscopique est raisonnablement utilisable pour des distances inférieures à 20 mètres. Au-delà, la perception du relief est altérée.

Informations monoculaires

Occlusions

L'occlusion visuelle est un indice de perception de la profondeur qualitatif. Il permet de fournir une information spatiale topologique de la position des objets de la scène sur l'axe de la profondeur. Lorsque l'observateur est en mouvement, l'occlusion cinétique permet d'établir une stratégie motrice pour améliorer l'efficacité, ou lever l'ambiguïté, de l'occlusion statique.

Perspective

La perspective visuelle est une transformation d'une portion du monde spatial tridimensionnel vers une projection bidimensionnelle courbe, sur la rétine. C'est l'indice qui favorise le plus la compréhension de la troisième dimension (la dimension de profondeur) sur une image 2D. La perspective répond à un ensemble de lois géométriques, telles que le parallélisme des segments verticaux de la scène observée,

ou le positionnement des points de fuite sur la ligne d'horizon, qui permet d'identifier la position du sol dans la scène visuelle. D'ailleurs, dans les environnements virtuels, la présence du sol permet de mieux tirer parti des informations de perspective, donc de disposer d'un indice de perspective plus fiable (Sinai & al, 1998).

Parallaxe

Le mouvement de parallaxe (*Figure 11*) confère l'impression que les objets qui sont à différentes distances de nous bougent à différentes vitesses quand on déplace la tête latéralement. Plus les objets sont distants, plus le mouvement de parallaxe est faible. La parallaxe de mouvement dépend du point de fixation du regard. En avant et en arrière de ce point, l'environnement visuel semble se déplacer en sens contraire. Bien sûr, cet indice peut être utilisé pour percevoir la profondeur des objets, dans la mesure où ceux-ci auront des vitesses et des directions de déplacement visual différentes en fonction de leur profondeur et de leur positionnement par rapport au point de fixation. En réalité virtuelle, cet indice peut être restitué artificiellement grâce au "tracking" de tête, il suffit alors de mettre à jour le visuel en fonction de la position de l'observateur.

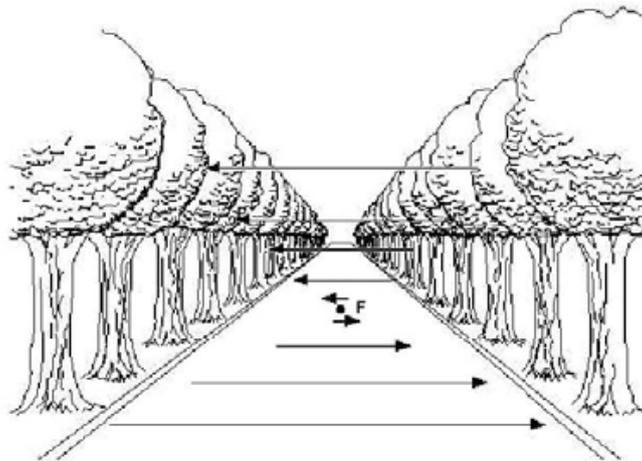


Figure 10 : Lorsqu'un observateur fixe le point *F* de la scène et déplace la tête de droite à gauche, les objets de la scène situés en avant de *F* semblent se déplacer dans le sens inverse de son déplacement, alors que les objets situés derrière le point *F* se déplacent dans le même sens que la tête de l'observateur. Les vitesses de déplacement sont plus faibles au fur et à mesure que l'on se rapproche du point *F*.

4 Modalité haptique

4.1 Les récepteurs

4.1.1 Mécanorécepteurs cutanés

La peau est riche en innervations afférentes, dont la densité varie beaucoup d'une zone du corps à l'autre. Ainsi, les parties du corps les plus sensibles au toucher sont les extrémités de la langue et des doigts. Dans ces zones, le seuil de sensibilité à une stimulation mécanique par pression, correspond à un enfoncement de 6 μm de la peau, tandis que le seuil de discrimination spatiale est compris entre 1 et 3 mm. Dans les dos, la zone la moins dense en récepteurs, le seuil de discrimination spatiale atteint 50 à 100 mm.

On distingue trois propriétés de la sensibilité mécanique cutanée :

- La sensibilité à la pression : elle concerne les pressions importantes sur la peau.
- La sensibilité à la vibration : elle répond à des variations de pression dans une gamme de fréquences de 30 à 1500 Hz.
- La sensibilité à la vitesse : c'est le toucher proprement dit, au sens du contact léger avec la peau glabre ou velue.

Les mécanorécepteurs cutanés sont composés de 4 types de récepteurs (*Figure 12*) :

- Les corpuscules de Pacini, sont les récepteurs cutanés les plus importants en nombre et les plus étudiés, ils peuvent atteindre une taille de 2 mm. Ces récepteurs profonds, à adaptation rapide, sont de type phasique et sont particulièrement sensibles aux vibrations.
- Les corpuscules de Ruffini sont situés dans le derme. Ce sont des récepteurs profonds, à adaptation lente, sensibles à l'étirement de la peau. Ils sont également présents dans les articulations, ancrés aux ligaments.
- Les corpuscules de Meissner, dix fois plus petits que les corpuscules de Pacini, sont situés immédiatement sous l'épiderme. Ces récepteurs superficiels, à adaptation rapide, sont particulièrement sensibles à la vitesse des stimuli.
- Les récepteurs de Merkel, sont des récepteurs superficiels à adaptation lente qui répondent à des pressions localisées (enfoncement de la peau) de la région pileuse ou glabre. Ils peuvent ainsi coder la position et la vitesse du stimulus, soit l'indentation de la peau.

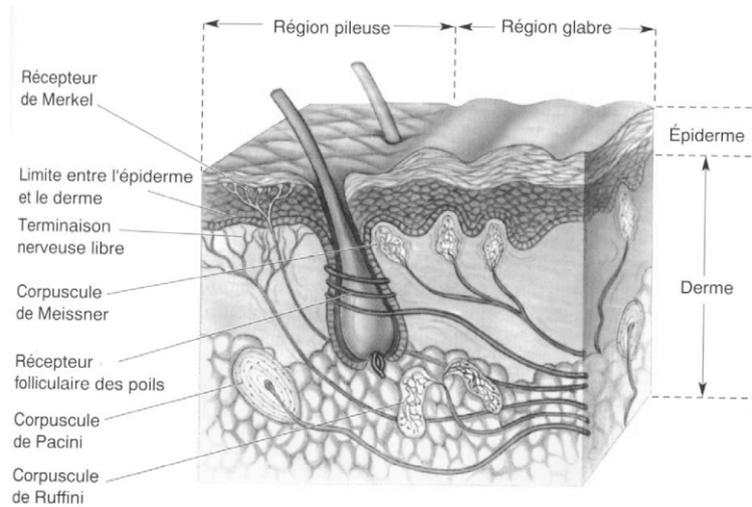


Figure 11 : Coupe transversale de la peau avec représentation schématique des différents mécanorécepteurs cutanés

4.1.2 Récepteurs musculaires et articulaires

Le sens proprioceptif permet de connaître la position spatiale du corps, mais également la position des membres par rapport au positionnement du corps. Le sens haptique permet, lui, d'apprécier l'effort exercé sur nos membres lors d'un mouvement ou d'une tâche de production d'effort.

Pour cela, nous disposons de récepteurs musculaires et articulaires (*Figure 13*) qui nous fournissent 3 types d'informations :

- La sensibilité à la position : elle concerne les angles formés par chacune de nos articulations, donc la position relative des membres entre eux et par rapport au corps.
- La sensibilité au mouvement : elle concerne la sensation de vitesse, de direction et d'amplitude des mouvements des membres.
- La sensibilité à la force : elle concerne l'effort de résistance qui s'exerce au niveau des membres. Cette information étant couplée à la perception de la pression cutanée, il est difficile de distinguer la perception de force provenant des récepteurs musculaires, articulaires et cutanés.

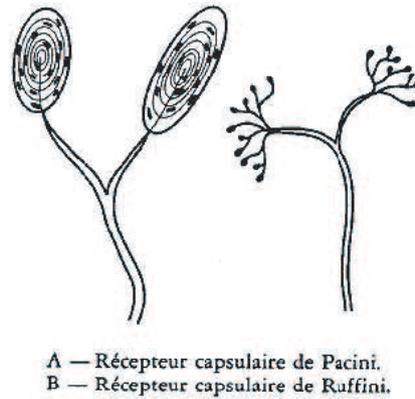


Figure 12 : Différents types de récepteurs articulaires : récepteurs capsulaires de Pacini et récepteurs capsulaires de Ruffini

Mécanorécepteurs musculaires : fuseaux neuromusculaires

Les fuseaux neuromusculaires assurent le contrôle du tonus musculaire. Ils sont sensibles à l'étirement du muscle et sont à la base du réflexe myotatique². Composés, entre autres, de 4 à 25 petites fibres musculaires particulières, dites intrafusales, ils sont disposés dans le corps du muscle parallèlement aux fibres musculaires classiques, dites extrafusales.

On distingue deux types de fibres intrafusales :

- Les fibres recevant une innervation sensitive : elles peuvent être sensibles à la longueur d'étirement du muscle, ou à la dynamique d'étirement du muscle (vitesse, accélération).
- Les fibres recevant une innervation motrice : elles assurent la contraction des fibres intrafusales, qui modifient l'excitabilité des fibres sensibles innervant les fuseaux, en déformant mécaniquement le récepteur.

Mécanorécepteurs tendineux : organes de Golgi

Les organes tendineux de Golgi, composés de fibres de collagène, sont situés aux jonctions myotendineuses³. À l'une des extrémités de l'organe tendineux, ils s'insèrent sur les aponévroses tendineuses⁴ ; à l'autre extrémité, ils sont connectés aux fibres musculaires de toutes natures. Ils présentent une sensibilité dynamique très développée et renseignent le système nerveux central sur les variations de la force contractile du muscle (*Jami, 1992*).

² On appelle réflexe myotatique la contraction réflexe d'un muscle, provoquée par son propre étirement.

³ Les jonctions myotendineuses sont des jonctions muscle - tendon

⁴ Les aponévroses tendineuses sont des bandes de tissus résistants, qui ont la fonction de tendons

Mécanorécepteurs articulaires

Les récepteurs capsulaires de Ruffini constituent la majorité des récepteurs articulaires. Ils répondent à la fois à des stimuli dynamiques et statiques. Ils sont actifs pour des angles précis d'activation, proches des positions extrêmes, en flexion ou en extension du membre.

4.2 Résolution spatiale du toucher

La résolution spatiale du toucher est la distance minimale entre deux points cutanés stimulés par contact et perçus isolément. Cette distance est également appelée "seuil de discrimination tactile", elle varie en fonction de la zone du corps stimulée (*Figure 14*). La résolution spatiale la moins fine est identifiée au niveau du dos, où deux stimulations tactiles doivent être distantes d'au moins 40 mm pour être perçues distinctement. À l'inverse, à l'extrémité des doigts, deux stimuli séparés de 3 mm seulement peuvent être identifiés distinctement : c'est la zone du corps où la résolution spatiale est la plus fine. La précision de la résolution spatiale du toucher est directement liée à la densité des mécanorécepteurs présents dans chaque zone du corps. Dans le cas de la main, la résolution spatiale de l'extrémité des doigts, plus richement innervés en récepteurs de Merkel et Meissner, est supérieure à celle des phalanges et de la paume (*Figure 14*). Ce résultat implique une corrélation directe entre la proportion de mécanorécepteurs présents dans une zone de la peau et la résolution spatiale du toucher dans la zone en question (*Vallbo & Johansson, 1978*).

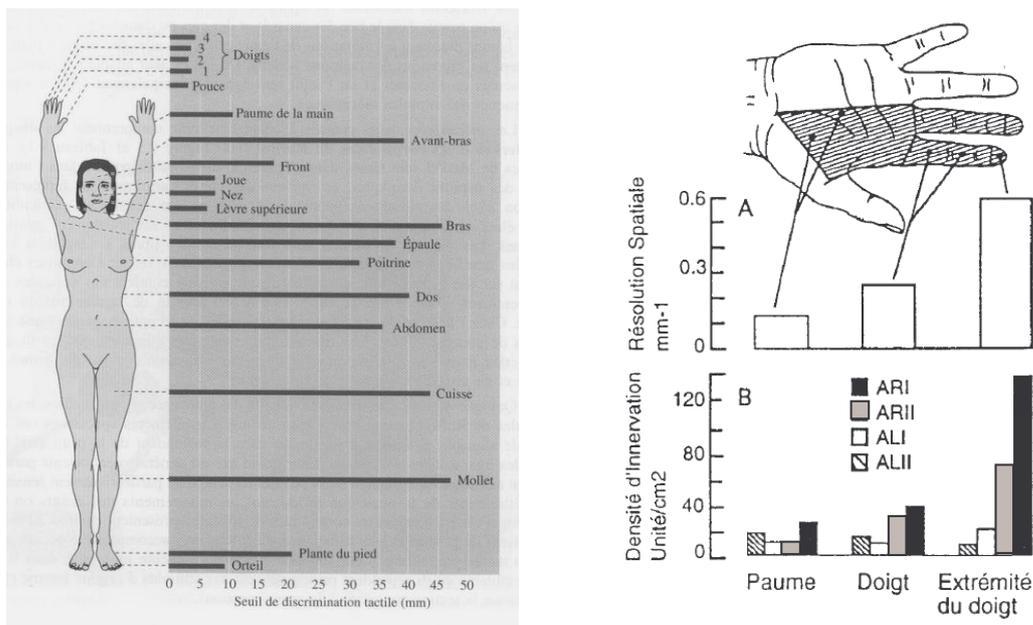


Figure 13 : à gauche, seuils de discrimination tactile, entre deux points de stimulation, par contact pour différentes parties du corps humain. à droite, résolution spatiale des différentes parties de la main et distribution des mécanorécepteurs présents dans différentes parties de la peau glabre de la main. (*Johansson & Vallbo, 1976*)

4.3 Perception de la force : force absolue ou effort musculaire

Deux théories s'opposent pour expliquer la perception et la mémorisation de la direction d'une force appliquée à un sujet. Il s'agit des théories de la force absolue ou de l'effort musculaire. La première affirme l'existence d'un référentiel allocentrique : le sujet aurait tendance à percevoir la direction de la force dans un référentiel extérieur absolu. La deuxième consiste à penser que les forces seraient perçues dans un référentiel égocentrique, sous forme d'effort musculaire exercé par chaque muscle de la chaîne sollicitée. Par exemple, (*Toffin & al, 2003*) démontrent que les sujets perçoivent et mémorisent les forces appliquées par la main en terme d'activité motrice mise en jeu pour résister ou produire la force, plutôt qu'en terme de vecteur de force.

4.4 Intégration haptico-proprioceptive : perception active

Le système perceptif haptico-proprioceptif peut appréhender presque toutes les capacités auxquelles accède la vision. Cette modalité est très bien adaptée à la perception des propriétés matérielles (surtout la texture) des objets, tandis qu'elle est sensiblement moins performante que la vision dans le domaine spatial (dimension, orientation).

Deux types de perceptions haptiques sont distinguées : tout d'abord, la perception passive, résulte de la stimulation tactile d'une partie du corps immobile ; ensuite, bien plus complexe et riche en informations sensorielles, la perception active consiste à explorer activement un objet avec la main pour en percevoir la forme, la texture, la souplesse... Intervient alors une intégration sensorielle haptique et proprioceptive pour faire émerger la forme de l'objet exploré tactilement. Contrairement aux autres modalités, qui disposent uniquement d'une fonction perceptive, la modalité haptique possède une spécificité unique puisque la main est dotée à la fois d'une fonction perceptive et motrice. Dès lors, il apparaît que perception et action sont étroitement liées dans le cas de la modalité haptique, plus que dans toute autre modalité sensorielle.

4.4.1 Perception des orientations : effet d'oblique

Dans la perception haptique des orientations, l'axe vertical et l'axe horizontal sont privilégiés, car ils correspondent respectivement à des valeurs de référence, qui sont la direction de la gravité et à celle de l'horizon visuel. La combinaison de ces axes forme un cadre de référence dans un espace bidimensionnel où toutes les autres orientations sont dites obliques. Globalement, la perception des orientations est plus précise en vision qu'en haptique (*Gentaz & al, 2001*).

Si l'effet d'oblique a été largement démontré pour la perception visuelle, son existence dans le cas de la perception haptique a souvent été débattue dans la littérature. La première hypothèse sur le sujet, lancée par (*Lechelt & al, 1976, 1980*), prône l'existence d'un effet d'oblique intrinsèque au système haptique, identique à celui observé pour le système visuel. Cette hypothèse est invalidée par (*Appelle & al, 1985, 1986*), pour qui l'effet d'oblique dans la perception haptique dérive d'une part de l'effet d'oblique visuel, et d'autre part du processus d'exploration - reproduction des orientations en conditions controlatérales⁵, dans la mesure où le système épaule-main n'est pas symétrique pour les orientations obliques, alors qu'il l'est pour les orientations verticales et horizontales. Plus récemment, l'effet d'oblique en perception haptique a été démontré dans les plans frontal et sagittal, en condition ipsilatérale⁶ ou controlatérale de reproduction des orientations par (*Gentaz & Hatwell, 1995, 1996, 1998*), d'après lesquels cette anisotropie serait également due à l'influence de l'effort gravitationnel qui s'exerce sur le système épaule-main.

4.4.2 Perception de la courbure

La perception haptique d'une courbure, sans l'aide de la vision, se dégrade avec l'augmentation de la taille du stimulus. La précision est idéale lorsque le stimulus est inférieur à la taille du doigt, car l'exploration tactile ne fait pas intervenir des mouvements du système épaule-main (*Gordon & Morison, 1982*). Sachant que l'exploration active de la forme d'un objet s'appuie sur des indices géométriques et des indices de force ; lorsque des sujets, immergés dans un environnement virtuel, passent le doigt sur une forme de bosse, ils s'attendent à ressentir une force dont la direction et l'amplitude sont corrélées avec la pente de la bosse (plus la pente est raide, plus la résistance opposée au doigt est grande). Cependant, en l'absence de retour visuel sur la géométrie de l'objet, lorsqu'une bosse est présentée avec les indices de force d'un trou, les sujets perçoivent la géométrie d'un trou. Inversement, lorsqu'un trou est présenté avec les indices de force d'une bosse, les sujets perçoivent la géométrie d'une bosse. Par conséquent, les indices de force, même erronés, peuvent dominer la géométrie réelle des objets lors d'une exploration haptico-proprioceptive active (*Robles-de-la-Torre & Hayward, 2001*).

Sur la base de cette observation, on peut transposer l'exercice à la perception de la courbure d'une arche par exploration active à l'aide d'un bras à retour d'effort (*Figure 15*). Les résultats confirment l'intégration sensorielle qui s'opère chez les sujets entre les indices de position et de force du doigt explorant une arche. Par exemple, la perception de la géométrie des arches hautes, plus convexes, s'appuie davantage sur les indices de position du doigt, tandis que pour des arches basses, plus concaves, ce sont les indices de force qui semblent prépondérants (*Drewing & Ernst, 2006*). De plus, pour une géométrie donnée, la modification de l'amplitude ou de la direction des forces (modification de la friction) exercées sur le doigt fait évoluer, sur la base de leur fiabilité, la pondération des indices de force et de position intégrés par les sujets pour évaluer la courbure de l'arche (*Drewing & al, 2008*).

⁵ Condition controlatérale : stimulation et tâche de reproduction avec des mains différentes.

⁶ Condition ipsilatérale : stimulation et tâche de reproduction avec la même main.

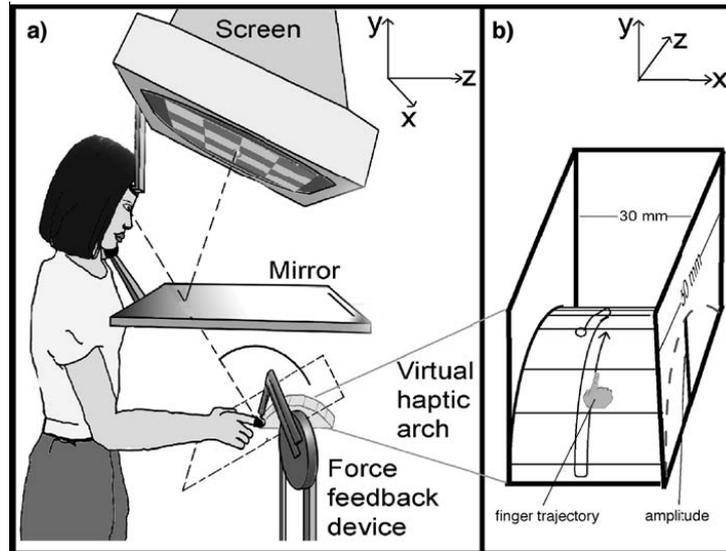


Figure 14 : A gauche, Dispositif expérimental comprenant un bras à retour d'effort pour la perception haptique de la courbure de l'arche dans l'environnement virtuel. A droite, trajectoire du doigt sur l'arche virtuelle. (Drewing & Ernst, 2006)

4.4.3 Perception des longueurs

De manière générale, la perception des longueurs est plus précise avec la modalité visuelle qu'avec la modalité haptique. Lorsque la modalité visuelle est dégradée, voire inexistante, il existe plusieurs manières de mesurer une longueur par le toucher, à l'aide d'une intégration haptico-proprioceptive des informations perçues :

- Mesure active d'une longueur en plaçant ses deux index aux extrémités du stimulus. La longueur perçue augmente proportionnellement à la longueur physique (réelle) du stimulus.
- Déplacement de l'index le long du stimulus. On observe également une augmentation linéaire de l'estimation en fonction du stimulus physique.
- Mesure de la longueur par pincement entre le pouce et l'index. Cette méthode a tendance à surestimer les longueurs lorsque l'écartement des doigts tend vers le maximum.

5 Intégration visuo-haptique

5.1 Evolution avec l'âge

Etant donné la différence indiscutable qui existe entre l'image rétinienne d'un objet vu par l'œil et sa perception visuelle proprement dite, qui inclut les notions de forme, de taille, de profondeur et d'orientation ; tout portait à croire dès le 18^{ème} siècle qu'un nouveau né doit apprendre à voir à la naissance. Sur ces observations, il fut proposé que la source d'apprentissage la plus probable était le sens du toucher, donc qu'un enfant apprenait à voir en s'aidant de la représentation tridimensionnelle des objets que lui procurait sa perception tactile.

Dans les années 60, une série d'expérimentations tente d'apporter des réponses aux observations contradictoires qui entourent la perception de la vision et du toucher. En effet, la reconnaissance de forme par le toucher paraît bien imprécise pour servir de base à la construction de la perception visuelle. De plus, il a été démontré que la vision est déjà très développée juste après la naissance. Les bébés ont une bonne perception des profondeurs et les enfants perçoivent les tailles et les formes aussi bien que les adultes.

Sur ces observations, (*Rock & Harris, 1967*) mènent une série d'expériences, dans lesquelles ils provoquent des conflits entre les perceptions visuelle et haptique. Les sujets doivent évaluer la taille d'un objet par le toucher, tandis que la perception visuelle de la taille de l'objet est altérée par des lentilles ou des prismes déformants. Les résultats démontrent que la vision domine largement le toucher. Ainsi, lors d'un conflit sensoriel, si le toucher donne une information qui n'est pas cohérente avec la vision, c'est l'information visuelle qui détermine la perception finale. Ce phénomène illusoire s'appelle la "capture visuelle", il est également présent chez les enfants de 4 à 5 ans et évolue peu avec l'âge (*McGurk & Power, 1980 ; Warren & Pick, 1970*).

5.2 Domination de la vision dans la perception du corps

L'analyse neurologique du cortex pré-moteur d'un singe montre que la perception de la position du bras émerge de la somme des indices, visuels d'une part et haptico-proprioceptifs d'autre part, qui convergent vers les mêmes neurones. Que le bras soit visible, ou caché et représenté par une maquette, ces neurones en définissent systématiquement la position en adéquation avec les informations visuelles, poussant le singe à s'approprier la maquette en lieu et place de son propre bras (*Graziano, 1999*).

Sur des sujets humains, l'illusion dite de la main en caoutchouc permet de mettre en évidence l'influence dominante de la vision sur la proprioception dans la représentation mentale de notre propre corps. Lorsque la main d'un sujet et une main en caoutchouc sont stimulées tactilement par la caresse d'un pinceau, de façon synchronisée, le sujet peut percevoir la main en caoutchouc comme faisant partie de son propre corps. Si la main factice est remplacée par un bâton en bois, l'illusion

disparaît, ce qui montre l'importance du réalisme de la stimulation visuelle. De plus, il apparaît que la synchronisation spatiotemporelle de la stimulation tactile entre les deux mains est une condition nécessaire mais pas suffisante à l'apparition de l'illusion (Tsakiris & Haggard, 2005). En cas de désynchronisation d'orientation entre la main du sujet et la main en caoutchouc, on s'aperçoit que le phénomène de d'appropriation persiste jusqu'à un certain seuil. En particulier, pour de faibles différences d'orientation entre la main du sujet et la main en caoutchouc, tant que l'orientation des stimulations reste synchronisée dans le référentiel de la main, l'illusion persiste, et ce même si l'orientation des stimulations n'est plus synchronisée dans le référentiel extérieur. Il apparaît donc que, la perception tactile se fait dans un référentiel centré sur la main, dont l'origine est réévaluée lorsque celle-ci est en mouvement (Costantini & Haggard, 2007). Ces deux expérimentations suggèrent que l'appropriation du corps dépend d'abord d'une représentation mentale de ce dernier. Dans cette représentation du schéma du corps, en cas de conflit visuo-proprioceptif, la perception visuelle des membres tend à prendre le dessus sur leur localisation haptico-proprioceptive.

Dans les domaines de la simulation et de la réalité virtuelle, en utilisant des dispositifs à retour d'effort qui délivrent des stimulations haptiques cohérentes avec la perception visuelle de l'environnement, nous pouvons nous attendre à un transfert proprioceptif depuis la main du sujet vers l'avatar qui la représente virtuellement. Dans certains cas, on pourrait même s'attendre à une capture visuelle totale. Si une désynchronisation spatiale ou temporelle devait survenir, le phénomène d'appropriation peut perdurer jusqu'à un certain seuil de désynchronisation.

5.3 Introduction à la méthode psychophysique

La démarche psychophysique se focalise sur l'analyse d'une grandeur physique de l'environnement expérimental (la taille ou l'orientation d'un objet, sa luminosité, son poids, sa rugosité...) pour en mesurer l'estimation effectuée par nos modalités perceptives. Toute estimation d'une dimension physique par nos sens possède une certaine variance. Lorsque les estimations sont répétées, elles prennent la forme d'une distribution de densité de probabilités. Schématiquement, cette distribution ressemble à une Gaussienne (Figure 16) dont la moyenne est S_p (dimension perçue par le sujet) d'écart-type σ , et de coefficient de fiabilité r .

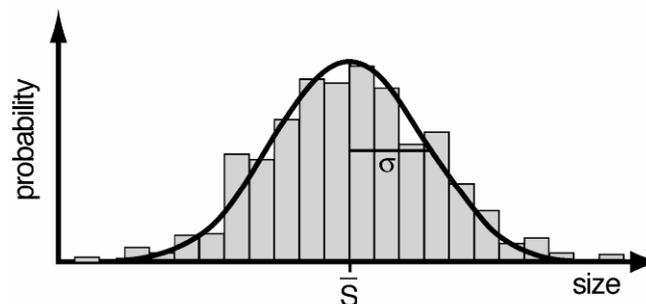


Figure 15 : La variabilité de l'estimation répétitive d'une dimension fixe peut être schématisée par une distribution de densité de probabilités à répartition Gaussienne, de moyenne S et d'écart-type σ .

L'étude des modalités visuelle, haptique et proprioceptive se base en règle générale dans la littérature sur des tâches de détection de seuil, de reproduction d'un stimulus de référence, ou des tâches de discrimination entre deux stimuli. La plupart du temps, il est imposé aux sujets un paradigme à choix forcés. Le sujet doit comparer des paires de stimuli, composées d'un stimulus de référence, d'une dimension physique donnée S_0 , et d'un stimulus pris dans une gamme de valeurs qui encadre cette valeur de référence S_0 , tout en prenant soin de présenter les stimuli dans un ordre aléatoire pour éviter les mécanismes d'apprentissage.

Courbe psychométrique

Le choix de la question posée est très important en psychophysique, elle doit être la plus neutre possible pour ne pas modifier la stratégie du sujet. On peut par exemple demander si "le 2^{ème} stimulus est plus grand que le 1^{er} ?". Les jugements du sujet, se limitent à un choix à deux réponses forcées "oui / non", permettent de tracer une courbe psychométrique (Figure 17), qui servira à identifier le point d'équivalence ou PSE (Point of Subjective Equality).

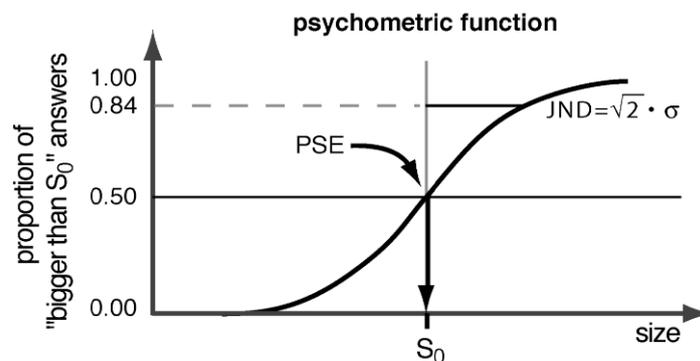


Figure 16 : Courbe psychométrique représentant la proportion de réponses positives pour chaque stimulus de la gamme expérimentale choisie. Le PSE est le point de la courbe à 50% de réponses positives, il reflète la dimension du stimulus perçue par le sujet. Une estimation du JND se lit à 84% de réponses positives

Le PSE sur la Figure 17 correspond à une proportion de 50% de réponses positives. Cela signifie que pour la dimension S_p qui lui est associée, le sujet donne autant de réponses positives que négatives. Dans un cas idéal, si l'estimation de la modalité employée pour mesurer S_p n'est pas biaisée, on aura $S_p = S_0$ comme on peut le voir sur le schéma.

La psychophysique repose essentiellement sur la notion de "seuil différentiel", communément appelé dans la littérature *JND*, pour (Just Noticeable Difference), ou *JND%*, donné en pourcentage de la valeur de référence :

$$JND\% = \frac{JND}{S_0} \cdot 100$$

Cet indicateur mesure la limite en dessous de laquelle un individu ne parvient plus à différencier deux stimulations de même nature, mais de dimensions différentes. Le *JND* définit en quelque sorte la résolution de la perception sensorielle. Comme on peut le voir sur la *Figure 17*, une estimation du *JND* peut se mesurer sur la courbe entre le *PSE* et le point de la courbe correspondant à une proportion égale à 84% de réponses positives. Par conséquent, le *JND* dépendra de la pente de la courbe psychométrique obtenue. Plus la pente est raide, plus le *JND* est faible, plus la perception sensorielle possède une capacité de discrimination fine.

$$r = 1/\sigma^2 \qquad JND = \sqrt{2} \cdot \sigma$$

A partir des résultats expérimentaux, il est donc possible de calculer le *JND* pour en déduire l'écart-type σ de la distribution de densité de probabilités. Celle-ci servira à calculer le coefficient de fiabilité (reliability) de l'estimation, noté *r*.

L'intégration visuo-haptique d'après l'approche statistique consiste alors à penser que l'estimation bimodale d'une grandeur se rapprochera de l'estimation uni-modale qui présente le moins de variance (donc la modalité la plus fiable) lors de l'estimation de cette grandeur (*Figure 18*).

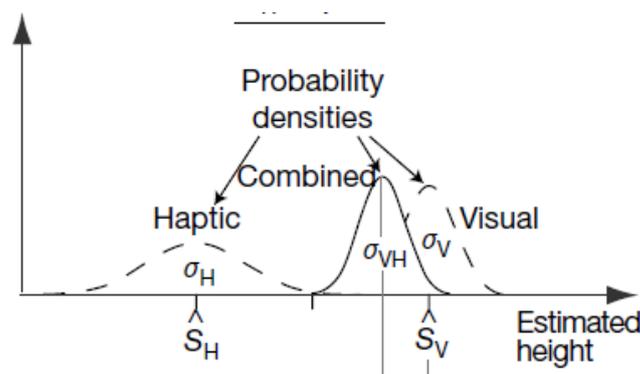


Figure 17 : Sur cet exemple, l'estimation visuelle de la taille du stimulus (S_V) présente une variance plus faible que l'estimation haptique (S_H). Par conséquent, l'estimation visuo-haptique (S_{VH}) est plus proche de l'estimation visuelle uni-modale. L'intégration visuo-haptique donne plus de poids à la modalité qui présente la plus faible variance de probabilité de réponses

5.4 Perception des tailles

Afin de comprendre la manière dont se construit l'intégration visuo-haptique des tailles chez l'enfant, on soumet des sujets (5 et 10 ans) à une tâche de discrimination (2 choix alternatifs forcés). Les résultats des tâches unimodales, visuelle et haptique, sont rapportés ci-dessous (*Figure 19*).

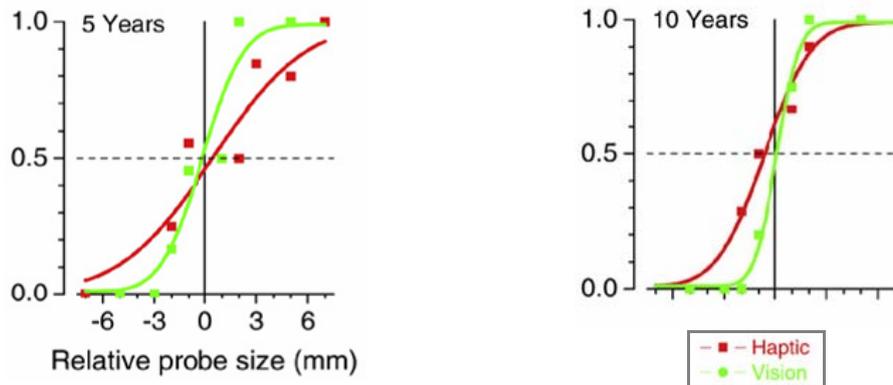


Figure 18 : Courbes psychométriques des perceptions unimodales, visuelle et haptique. Dans les deux cas, la taille perçue est quasi-identique et conforme à la taille physique de l'objet mesuré. A gauche, pour les enfants de 5 ans, on peut voir que le JND est un peu meilleur pour le visuel que pour l'haptique. A droite, les JND visuel et haptique diminuent de 30% pour des enfants de 10 ans. (Gori & al, 2008)

Entre 5 et 10 ans, la perception des tailles par intégration visuo-haptique est loin d'être aussi optimale qu'une estimation d'après un modèle statistique tel que le *MLE* (nous y reviendrons plus tard), qui d'après (*Ernst & Banks, 2002*) fournit de bonnes estimations de la perception visuo-haptique des tailles chez l'adulte. Pourtant, à 5 et 10 ans, étant donné la précision supérieure de la modalité visuelle seule, on aurait pu s'attendre à une domination de cette dernière dans l'intégration visuo-haptique. C'est le contraire qui se produit pour l'enfant de 5 ans. Ainsi, avant un certain âge (8 ans d'après les auteurs), on constate une domination nette de la modalité haptique sur l'estimation des tailles, mais également une difficulté à tirer parti des avantages de l'intégration visuo-haptique des informations. À 10 ans, l'intégration visuo-haptique a évolué vers une domination du visuel pour la même tâche (*Figure 20*). Par la suite, cette domination du visuel se perpétue à l'âge adulte (*Gori & al, 2008*).

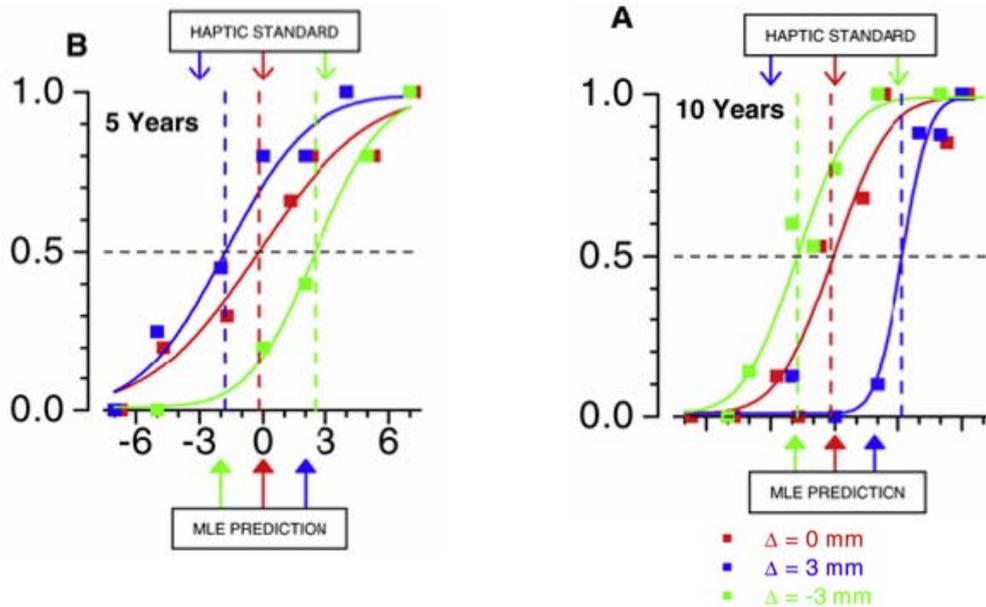


Figure 19 : Courbes psychométriques pour la modalité visuo-haptique, en présence d'un conflit spatial sur la taille, de dimension Δ . Le JND s'améliore nettement entre 5 et 10 ans. A gauche, l'ordre des PSE est conforme à celui qui est obtenu avec la modalité haptique. A droite, l'ordre des PSE vérifie les prédictions d'un MLE. (Gori & al, 2008)

En utilisant une tâche de discrimination similaire chez l'adulte, mettant en œuvre les sens haptique et visuel pour évaluer la taille d'un échantillon, (Ernst & Banks, 2002) observent, en conditions unimodales, que la précision visuelle est supérieure à celle de l'haptique (JND visuel plus faible). L'introduction de bruit visuel dégrade cette performance, se traduisant par une augmentation du JND visuel, donc de la variance propre à cette modalité. À un niveau de 67% de bruit visuel, les JND unimodaux visuel et haptique sont similaires. Si on continue à dégrader la vision, l'haptique prend l'ascendant, sa variance et son pouvoir discriminant deviennent meilleurs que ceux de la vision. L'analyse bimodale révèle une convergence vers la performance unimodale haptique lorsque le bruit visuel augmente. La vision devenant moins fiable (sa variance augmente), les participants se fient de plus en plus à la modalité haptique. La performance de discrimination visuo-haptique se rapproche alors de celle de l'haptique. Cette stratégie qui tend à optimiser la variance de l'estimation finale, en faisant évoluer dynamiquement la pondération de la vision et de l'haptique, peut être modélisée par un modèle MLE , tant les prédictions qu'il génère sont conformes aux résultats empiriques expérimentaux (Figure 21).

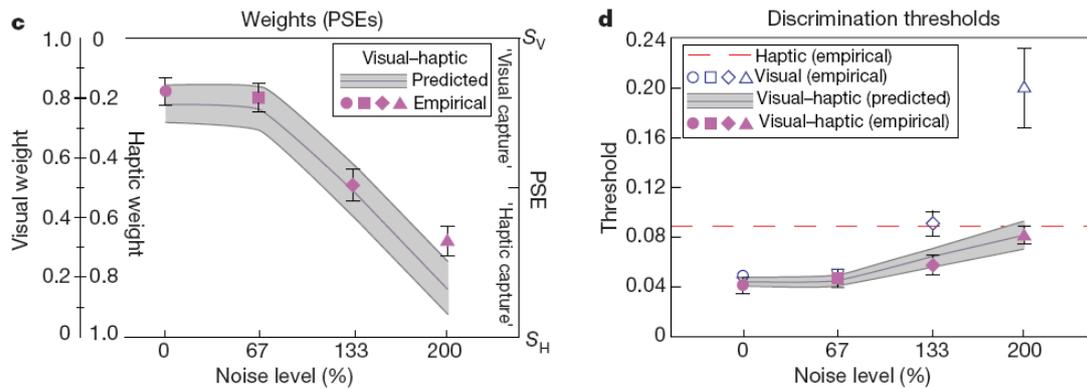


Figure 20 : Les deux graphiques rapportent des résultats relatifs à la condition visuo-haptique de l'expérimentation, on peut y constater la robustesse du modèle MLE pour prédire les observations empiriques expérimentales. A gauche, on s'aperçoit que le poids du visuel dans l'intégration des signaux visuel et haptique est écrasant en condition initiales (sans bruit), tandis qu'il chute jusqu'à inverser les proportions lorsqu'un bruit visuel important vient perturber cette modalité. A droite, le JND est fixe pour la modalité haptique seule. Il croît avec le niveau de bruit visuel dans la condition visuelle seule. A l'inverse, le JND obtenu par intégration visuo-haptique croît beaucoup moins que celui du visuel seul. Cela démontre que la stratégie d'intégration visuo-haptique tend à réduire le JND final, donc la variance de la perception finale. (Ernst & Banks, 2002)

Ces résultats sont corrélés par (Wu & al, 1999). Dans leur protocole expérimental, le biais visuel est généré par une distance grandissante d'observation à l'objet dont il faut estimer la taille. Les sujets perçoivent des tailles plus petites pour les objets les plus distants. D'après les auteurs, la dégradation des indices de perspective, liés à la perception visuelle, expliquent cette tendance à la sous-estimation des tailles. Il apparaît alors que l'introduction d'un retour haptique pour permet de réduire les biais visuels.

Il est également possible d'étudier l'intégration visuo-haptique pour la perception des longueurs, tout en provoquant un conflit par délocalisation de la position spatiale des signaux visuels et haptique. Dans ce cas, on retrouve une combinaison optimale (suivant un modèle MLE) des signaux pour la condition de référence (signaux colocalisés), mais on constate une réduction progressive des performances perceptives visuo-haptiques, proportionnellement à la désynchronisation spatiale introduite entre les deux signaux. Lorsque les signaux sont séparés de plus de 3 cm, la précision de discrimination bimodale devient moins bonne que les performances unimodales (Gepshtein & al, 2005). On pourrait donc penser qu'une intégration visuo-haptique optimale nécessite une corrélation spatiale de l'origine des signaux visuels et haptiques.

5.5 Perception de la raideur

On pourrait penser que notre perception de la raideur d'un ressort est essentiellement assurée par notre sens du toucher grâce aux modalités haptique (force renvoyée par le ressort) et proprioceptive (variations de longueur du ressort). Ces deux paramètres étant utilisés dans l'évaluation de la raideur, d'après la formule :

$$K = F / \Delta x$$

K = Raideur

F = Force

Δx = Variation de longueur du ressort

Grâce aux prémices de la réalité virtuelle appliquée aux expérimentations psychophysiques, (*Srinivasan & Beauregard, 1996*) démontrent que la modalité haptique seule, permet effectivement de détecter facilement des variations de raideur, à l'aide de ressorts virtuels. Dans un second temps, après introduction d'un retour visuel, conflictuel avec l'information proprioceptive rendant compte de la variation de longueur des ressorts, les auteurs concluent à une capture du visuel sur la modalité proprioceptive pour estimer les variations de longueur. Ainsi, plus le conflit est important, plus les estimations de raideur s'avèrent erronées. En effet, l'estimation de la raideur par intégration multimodale semble se baser sur la modalité haptique pour les informations de force perçue, et sur l'information visuelle en priorité, en présence d'un conflit visuo-proprioceptif, pour évaluer la quantité de compression ou d'extension du ressort.

Dans une étude ultérieure, (*Wu & al, 1999*) réalisent des observations similaires, à l'aide d'un environnement virtuel expérimental fournissant un retour visuel et haptique aux participants, dans lequel les participants devaient comparer la raideur de boutons poussoirs. En utilisant la modalité haptique exclusivement, lorsque les boutons à actionner sont positionnés côte à côte, les sujets parviennent à estimer de manière fiable la raideur physique des boutons. Le *JND%* (pourcentage du *JND* par rapport à la taille réelle du stimulus) est inférieur à 8%, ce qui démontre la qualité de la précision de la modalité haptique pour percevoir une raideur donnée. Dans le cas où les boutons ne sont pas à la même distance du sujet, le plus éloigné paraît avoir une raideur plus faible de 10% (différence perçue par les sujets). L'introduction d'un retour visuel permet d'annuler ce biais perceptif rencontré avec la modalité haptique seule (l'estimation des deux raideurs est de nouveau conforme à la raideur physique des boutons). En outre, l'intégration bimodale visuo-haptique a également pour effet de réduire de moitié le *JND%*, qui tombe à 5%.

Comme nous l'avons vu précédemment, cette domination des informations visuelles sur les informations proprioceptives, s'explique par la confiance que nous avons dans la fiabilité supérieure de la modalité visuelle pour estimer la taille des objets, ce qui est également vrai pour la perception des variations de longueur. Une nouvelle manifestation de cette domination visuelle a été démontrée par (*Lecuyer & al, 2001*) à l'aide d'un stylet haptique Phantom 6D. Si on modifie la force renvoyée par le ressort virtuel, sans modifier la longueur d'enfoncement de ce dernier, la raideur perçue sera différente. Pour continuer à percevoir une raideur constante, il est possible de compenser ce changement de force en modifiant la perception de variation de longueur du ressort par introduction d'un conflit visuo-proprioceptif. A l'inverse, il est possible de modifier la perception haptique d'un d'une force en altérant l'intégration visuo-proprioceptive des informations sensorielle par l'introduction d'un facteur d'échelle entre ces deux modalités.

Si la combinaison des perceptions de taille et de force nous permet d'estimer la raideur d'un ressort, que se passe-t-il lorsqu'on remplace l'information de taille par la luminance d'un objet par exemple ? Il faudra alors intégrer deux grandeurs a priori indépendantes, qui ne font l'objet d'aucun couplage dans notre quotidien. C'est cette originalité qu'a investiguée (Ernst, 2007). En effet, la pondération d'une intégration multi-sensorielle dépendant de la variance des modalités concernées. L'hypothèse est donc faite que les sujets ont recours à leurs connaissances antérieures et leur expérience pour savoir dans chaque situation expérimentale à quel sens il est préférable de se fier pour améliorer l'estimation finale de sa perception. Partant de là, il a été demandé aux participants d'estimer une raideur liant luminance et force de rappel, association pour le moins inhabituelle dans la vie courante.

Dans une phase de "pré-test", les sujets sont soumis à deux configurations visuo-haptiques : une avec des informations visuelles et haptiques cohérentes et l'autre avec un conflit visuo-haptique. Les *JND* visuels sont mesurés dans les deux cas. S'ensuit une phase d'entraînement, pendant laquelle seule la condition avec corrélation visuo-haptique est pratiquée. Pour finir, dans la phase de "post-test", on s'aperçoit que le *JND* visuel a augmenté pour la condition absente de la phase d'entraînement (condition avec conflit visuo-haptique), tandis qu'il baisse pour la condition présente à la phase d'entraînement (Figure 22).

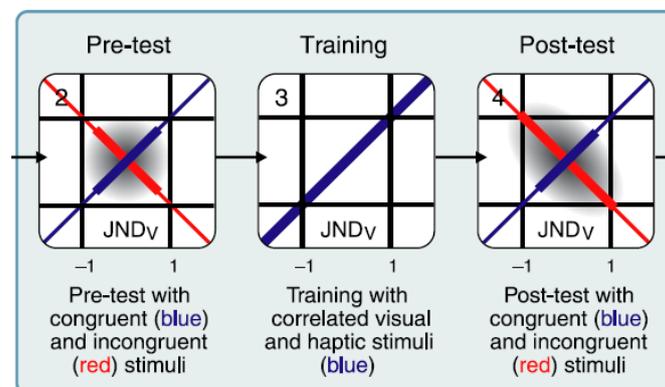


Figure 21 : De gauche à droite : le pré-test fournit des premiers *JND* pour deux couplages visuo-haptiques différents. Au milieu, une séance d'entraînement soumet le sujet à un seul des deux couplages. A droite, dans la phase de post-test, on s'aperçoit que les *JND* mesurés tendent à augmenter lorsque la condition testée était présente à l'entraînement, tandis qu'ils baissent lorsqu'elle en était absente. (Ernst, 2007)

Il est donc possible d'apprendre un couplage visuo-haptique préférentiel pour une tâche donnée. Dans la condition de corrélation visuo-haptique, la baisse du *JND* nous apprend également qu'une intégration visuo-haptique a eu lieu chez la plupart des sujets afin de réussir à réduire la variance de leurs estimations. En d'autres termes, il existe un couplage, inter-modalités, qui définit le poids de chaque modalité dans une tâche perceptive bien précise. Ce couplage émerge statistiquement de notre expérience dans la mesure où l'auteur est capable de définir un modèle Bayésien, intégrant la dimension liée à "l'expérience" des participants, baptisée *prior*. Ce modèle statistique permet d'estimer, fidèlement à l'expérimentation, les *JND*

observés. Ici, la luminance et la force sont deux grandeurs jamais associées dans la nature. Le *prior* est donc vierge dans ce domaine et peut être modelé lors de la phase de training. Par la suite, le *prior* accordera un poids plus important à la modalité avec laquelle il s'est entraîné.

Cette modélisation statistique de la perception n'est pas nouvelle. La variabilité étant une caractéristique fondamentale de tous les processus physiques et mentaux, l'approche statistique semble être adaptée pour comprendre et modéliser les mécanismes de perception. Le modèle de (*Ernst & Banks, 2002*) propose que l'estimation d'une grandeur physique, passant par la pondération des informations visuelles et haptiques, dépend de notre jugement sur la fiabilité de chacun des signaux, donc de la performance de chaque modalité prise individuellement. Plus la variance d'une modalité sera grande, plus on assistera à un transfert intermodal des pondérations vers une modalité plus performante, ceci afin de minimiser la variance de l'estimation finale. La pondération du visuel et de l'haptique dans le processus d'intégration visuo-haptique est donc rééquilibrée en permanence en fonction des changements de conditions de la tâche expérimentale. En utilisant un modèle, on peut espérer estimer statistiquement la perception humaine d'une dimension physique par intégration visuo-haptique.

5.6 Perception de la profondeur

Plusieurs indices visuels tels que la stéréoscopie, la parallaxe, la convergence, ..., contribuent à la perception de la profondeur d'un objet. Ces informations visuelles peuvent être renforcées, grâce au toucher, par des indices haptiques et proprioceptifs.

Afin de comprendre les mécanismes de pondération visuo-haptique pour la perception des profondeurs, on immerge des sujets dans un environnement virtuel à l'aide d'un casque HMD⁷ pour visualiser la scène et de deux bras à retour d'effort pour ressentir les collisions avec l'objet manipulé (*Atkins & al, 2001*). Ils doivent évaluer la taille, dans le sens de la profondeur, d'un objet cylindrique, en utilisant un seul indice visuel : la déformation de la texture appliquée sur l'objet, et des indices haptico-proprioceptifs : le toucher par pincement pour évaluer la dimension en profondeur de l'objet (*Figure 23*).

⁷ HMD : Head Mounted Display. Casque de réalité virtuelle avec traçage des mouvements de tête pour mettre à jour les images affichées. Ce dispositif permet de d'interagir avec la scène virtuelle par des mouvements de tête.

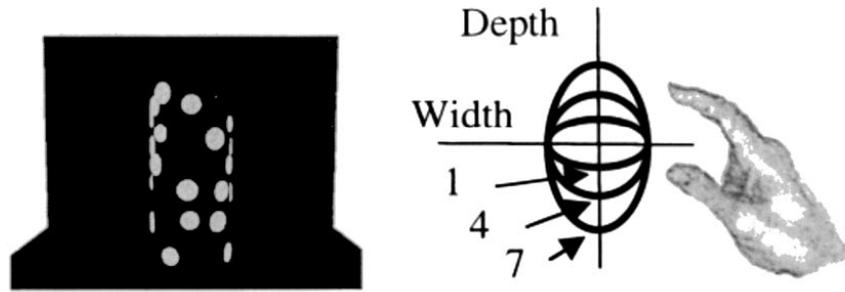


Figure 22 : A gauche, un aperçu de la scène vue par les sujets avec la texture qui fournit un indice visuel. Le reste de la scène est noir pour isoler l'indice de texture dans la perception visuelle. A droite, l'objet cylindrique dont il faut estimer la profondeur a toujours la même largeur (width), mais il peut avoir des dimensions de profondeur différentes (depth). (Atkins & al, 2001)

Au départ, l'évaluation de la précision de l'estimation de profondeur, lors de tâches alternativement visuelle et motrice, donne l'avantage à la modalité visuelle dans la pondération visuo-haptique. Si on impose un conflit visuo-haptique en présentant aux sujets des indices de texture incohérents, on assiste à une augmentation du poids de la modalité haptique. Si au contraire, ce sont les indices haptico-proprioceptifs qui sont biaisés, c'est le poids du visuel qui augmente. Lorsque les deux modalités sont dégradées, les sujets sont capables de reconnaître la modalité la plus fiable et pondèrent l'intégration sensorielle en sa faveur pour optimiser leur perception de profondeur.

Dans une étude ultérieure, menée par (Atkins & al, 2003), il est question d'estimer la profondeur relative de deux surfaces frontales parallèles. Pour cela, les sujets disposent d'indices visuels stéréoscopiques et d'indices haptico-proprioceptifs, grâce au pincement des surfaces. Dans un premier temps, les indices visuels et haptiques sont présentés aux sujets de manière corrélée. Puis un conflit visuo-haptique est introduit par dégradation de la modalité visuelle, en biaisant les indices stéréoscopiques. Il est intéressant de remarquer, qu'en présence d'un retour visuo-haptique cohérent, quelle que soit la distance d'observation, les sujets parviennent à fournir une estimation stable du stimulus (*Figure 24, courbe noire*). Cette estimation est également conforme à la grandeur réelle mesurée. Les mécanismes permettant d'adapter la perception visuo-haptique de la profondeur, en fonction de la distance sujet-stimulus ne sont pas mis en évidence dans cette étude. Dans la phase suivante, en situation de conflit visuel, on peut remarquer que la pondération dynamique des modalités en fonction de la distance d'observation disparaît, puisque la perception de profondeur diverge de la profondeur réelle (*Figure 24, courbe noire*). En outre, les estimations coïncident avec celles réalisées en condition haptique seule. Dans les conditions de la tâche, sans savoir laquelle des deux modalités est altérée, les sujets ont donc tendance à accorder plus de confiance à la modalité haptique pour percevoir la profondeur. la combinaison sensorielle haptico-proprioceptive semble fournir une information de référence pour ajuster la perception visuelle. Afin de relativiser ce résultat, il faut préciser que dans cette étude, les indices visuels se limitent à des indices stéréoscopiques, sans possibilité de recourir à des indices de parallaxe.

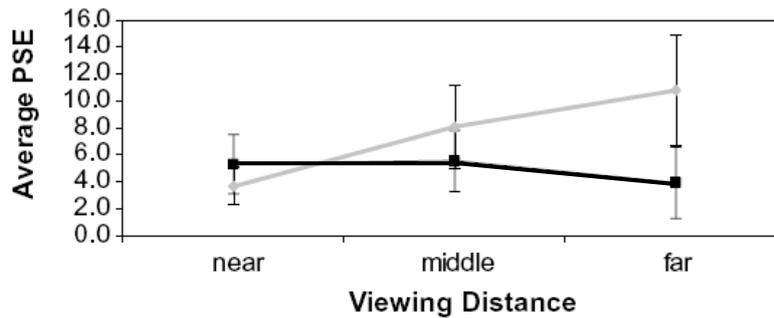


Figure 23 : La courbe noire représente l'estimation de la profondeur relative des deux plans frontaux parallèles, avant conflit (pré-test). La courbe grise correspond à cette estimation après un conflit visuo-haptique où seule la modalité haptique reste fiable pour estimer correctement la profondeur (post-test). (Atkins & al, 2003)

Nous voyons donc apparaître une exception dans la domination du visuel sur l'haptique. Les tâches d'estimation de profondeur semblent donner plus de poids à la modalité haptique qu'à la modalité visuelle dans le processus d'intégration visuo-haptique. L'observation faite sur la profondeur des plans frontaux est corrélée par une étude plus large réalisée par (Gepshtein & Banks, 2003). D'après les auteurs, la précision du toucher resterait inchangée quelle que soit l'orientation des surfaces dont il faut estimer l'écartement, alors que la vision serait plus précise que l'haptique pour des plans horizontaux et moins précise pour des plans frontaux (Figure 25).

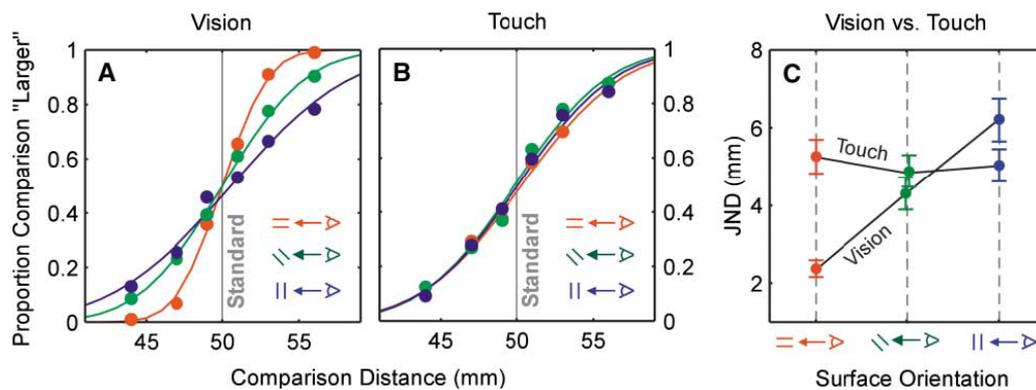


Figure 24 : Courbes psychométriques et JND des modalités visuelle et haptique lors d'une tâche d'évaluation de la distance entre deux surfaces parallèles dans différentes orientations. La précision de la perception haptique ne dépend pas de l'orientation des surfaces, contrairement au visuel. (Gepshtein & Banks, 2003)

5.7 Perception des orientations

Nous aborderons dans cette partie les mécanismes qui régissent la perception des orientations à l'aide de la vision et du toucher. Cette problématique a été étudiée chez l'enfant (5 mois, 5 ans et 8 ans) et chez l'adulte. Tout d'abord, on observe l'existence

d'un effet d'oblique⁸ dans les tâches de perception haptique des orientations chez les enfants âgés de 5 mois (*Gentaz & Streri, 2004 ; Kerzerho & al, 2005*). L'apport supplémentaire d'indices visuels semble influencer la perception haptique des orientations (*Kerzerho & al, 2008*). On assiste alors à une intégration visuo-haptique qui a pour effet de d'améliorer la précision de discrimination des orientations pour les directions verticale et oblique. Entre 8 et 10 ans, la vision domine toujours l'intégration visuo-haptique. Celle-ci tend vers une intégration optimale, identique à celle rencontrée chez l'adulte. Pendant le développement de l'enfant, le système perceptif nécessite un rééquilibrage constant en utilisant un sens pour en calibrer un autre, comme dans le cas de la vision et du toucher. Ce mécanisme laisse présager l'intégration multi-sensorielle optimale qui émerge chez l'adulte (*Gori & al, 2008*).

Nous avons vu que la perception de l'espace haptique révèle l'existence d'un effet d'oblique. Cet espace est donc non-euclidien. Nous savons également que les détails de l'intégration des signaux visuels et haptiques dépend de la tâche visuo-haptique à réaliser. Par exemple, si on demande à des sujets d'orienter deux barres parallèlement (*Figure 26*) dans un référentiel extérieur au sujet, sans l'aide de la vision (les yeux bandés), puis avec le concours d'une vision non-informative (le bras, la main et les barres sont cachés); on s'aperçoit que la précision haptique s'améliore significativement avec la vision non-informative, même si à aucun moment le sujet ne peut voir sa main. Au contraire, si on demande d'orienter les barres symétriquement (*Figure 26*) et par conséquent identiquement dans des référentiels centrés sur les mains, la vision non-informative ne permet plus d'améliorer la perception haptique. Dans ce dernier cas, cela veut dire que l'haptique est déjà dominant pour les tâches de positionnement symétrique. Plus largement, l'intégration des signaux dépend donc du référentiel qui est favorisé dans la tâche présentée (*Newport & al, 2002*).

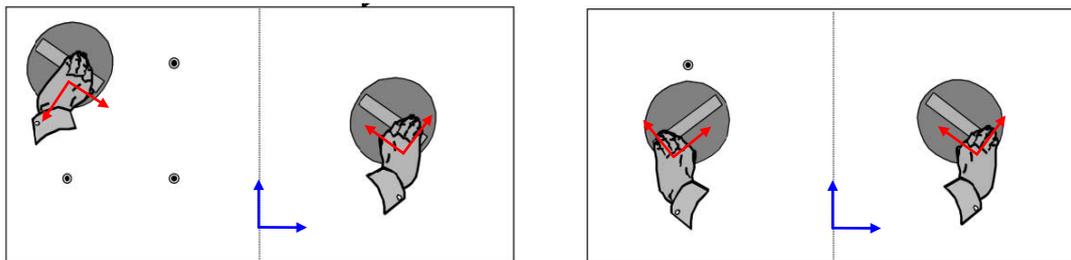


Figure 25 : A gauche, le sujet doit orienter les barres parallèlement, le référentiel extérieur (en bleu) est favorisé dans cette tâche. A droite, les barres doivent être orientées symétriquement si on se place dans le référentiel extérieur au sujet (en bleu), mais identiquement si on considère les référentiels centrés sur la main (en rouge). (*Newport & al, 2002*)

Ce protocole est repris par (*Kaas & al, 2007*) afin d'étudier l'impact d'un conflit spatial plus ou moins important entre la position visuelle et la position haptique des barres. A une exception près, dans cette expérimentation les participants peuvent voir les barres et leurs mains. Ils réalisent les deux tâches de positionnement : parallèle et

⁸ Effet d'oblique : capacité de discrimination des orientations plus fine autour des directions verticale et horizontale.

symétrique. Il s'avère que le conflit visuo-haptique dégrade la performance dans la tâche de positionnement parallèle, mais pas dans la tâche de positionnement symétrique (qui favorise le référentiel centré sur la main, dans la mesure où la position symétrique des barres est identique dans ce référentiel). Ce résultat démontre que nous modulons le poids du visuel et du toucher en fonction de la tâche à réaliser. Lorsque le référentiel de la main est favorisé à l'occasion d'une tâche de positionnement symétrique, le poids des modalités haptique et proprioceptive est tellement écrasant que l'introduction d'une information visuelle biaisée ne trouble pas la performance des participants. A l'inverse, lors d'une tâche de positionnement parallèle dans un référentiel extérieur, le poids de la vision étant plus important, la performance d'exécution de la tâche s'en trouve d'autant dégradée en présence d'un conflit entre la vision et le toucher. Nous sommes donc capables, en fonction du référentiel favorisé dans la tâche, de pondérer les signaux visuels d'une part et haptico-proprioceptifs d'autre part, afin de percevoir au mieux les orientations.

En se basant sur ces études, (Zuidhoek & al, 2004) ont cherché à comprendre les mécanismes qui expliquent l'apport de la vision non-informative à la perception haptique des orientations. Ils réitérèrent l'expérience en utilisant deux conditions visuelles : absence totale de signaux visuels ; informations visuelles non-informatives. Trois conditions d'orientation du regard sont testées à chaque sujet : vers la main qui manipule la barre de référence (barre immobile) ; vers la main qui manipule la barre test (barre d'ajustement) ; vers un point de fixation neutre devant soi (*Figure 27*). Globalement, la condition visuelle non-informative conduit à une baisse de la déviation entre la barre de référence et la barre test : dans les deux conditions "sans vision" et "avec vision non-informative", plus la direction du regard s'éloigne de la barre de référence, moins la performance est bonne (augmentation de la déviation entre les deux barres). Ce résultat sous-entend l'intervention de mécanismes neurocognitifs spécifiques en fonction de la zone observée, même si à aucun moment les sujets ne peuvent voir les mouvements qu'ils exécutent.

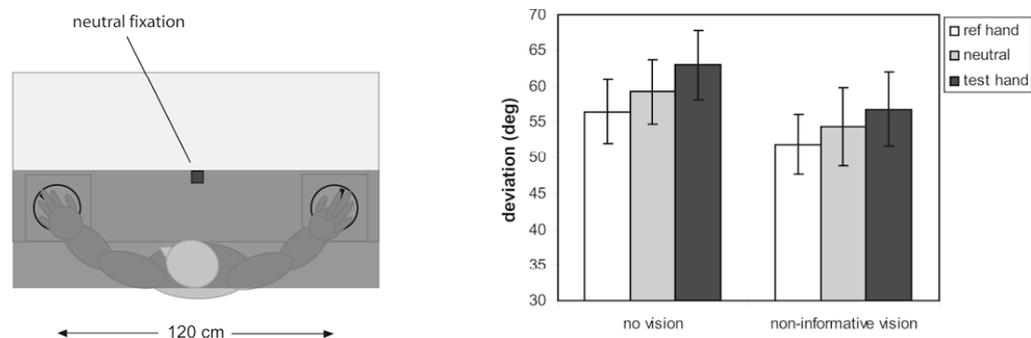


Figure 26 : A gauche, un aperçu du dispositif expérimental. Les sujets doivent positionner parallèlement deux barres. Ils regardent, en fonction de la condition expérimentale, la barre de référence, la barre test et une direction de fixation neutre. A droite, les résultats de la déviation moyenne en degrés entre les deux barres en fonction des différentes conditions expérimentales. (Zuidhoek & al, 2004)

5.8 Conclusion

La principale propriété qui ressort de toutes ces études est la capacité d'adaptation de la perception visuo-haptique à la plupart des conditions expérimentales testées. La pondération des modalités visuelle et haptique varie afin que l'estimation finale reste optimale. Il est vrai que la plupart du temps, la vision domine et qu'elle a tendance à être plus utilisée. D'ailleurs, la vision peut modifier la perception de propriétés spécifiquement haptiques comme la raideur par exemple. Cela dit, la modalité haptique, lorsqu'elle est utilisée, peut de son côté apporter une précision perceptive supplémentaire dans certaines mesures, telles que la profondeur par exemple.

Pour la perception des tailles, la vision est plus précise que le sens haptique. Dans des conditions de perception visuelle dégradées, le poids de l'haptique augmente dans l'intégration bimodale afin de compenser le manque d'indices visuels. Par contre, si on dissocie spatialement l'origine des signaux des deux modalités, on constate une capture (domination) franche du visuel.

Dans le cas de la raideur, cette grandeur est appréhendée grâce à une information de variation de longueur, qui peut lui être fournie par la perception visuelle et proprioceptive du système, et d'une information de force, fournie par des indices haptiques. Il est possible de modifier la raideur perçue d'un ressort virtuel en faisant varier le facteur d'échelle entre les déplacements physique de la main et les déplacements de son avatar virtuel. En l'absence de retour visuel, la raideur perçue augmente avec la distance à l'objet manipulé. L'introduction du visuel permet d'annuler ce biais perceptif.

Pour ce qui est de la perception des orientations, le visuel domine là encore l'intégration visuo-haptique, même si l'existence d'un effet d'oblique de la modalité haptique augmente le poids de cette dernière pour les orientations verticale et horizontale. Il apparaît également que les tâches de positionnement en orientation qui favorisent un référentiel lié à la main (symétrique) sont dominées par la modalité haptique, tandis que les tâches qui favorisent un référentiel extérieur à la main (parallèle) favorisent la modalité visuelle.

Pour finir, la profondeur semble être la seule dimension où l'haptique joue un rôle perceptif fondamental. Les études mettent en évidence la domination de la modalité haptique en cas de conflit visuo-haptique. Cependant, la perception haptique seule tend à surestimer la profondeur quand la distance sujet-stimulus grandit.

6 Perception et action des conducteurs

6.1 Fonctionnement d'une assistance électrique au volant

La direction assistée électrique compense les efforts nécessaires au braquage des roues du véhicule. Plus la vitesse du véhicule est élevée, plus l'assistance est faible, car la remontée d'effort issue des frottements au sol lors du changement de direction des roues diminue avec la vitesse. De plus, le retour d'effort au volant doit être d'autant plus grand que la vitesse est élevée afin d'assurer un contre-effort au volant capable d'assurer une bonne stabilité de la direction, donc une bonne maîtrise de la trajectoire à grande vitesse. Quoi qu'il arrive, le volant renvoie toujours un couple opposé au couple conducteur, et toujours inférieur, afin qu'il puisse continuer à braquer s'il le souhaite.

Le couple d'assistance est fourni à l'aide d'un moteur électrique. Ce couple est transmis aux pignons de la crémaillère par un réducteur. Il s'additionne au couple appliqué par le conducteur au volant.

La force exercée par le conducteur sur le volant est transmise mécaniquement à la crémaillère via les pignons. Ce couple conducteur est mesuré par l'intermédiaire d'un capteur de couple et envoyé au calculateur de direction assistée.

Le calculateur alimente le moteur d'assistance du volant en fonction :

- De l'angle appliqué au volant
- Du couple conducteur
- De la vitesse du véhicule

6.2 Méthode du "tangent point" en conduite

C'est (*Land & Lee, 1994*) qui observent en premier cette propriété des conducteurs, qui consiste à fixer le regard sur le point tangent à la courbe intérieure de la route, lors de manœuvres de prise de virage. Cette méthode est baptisée "tangent point", c'est l'une des stratégies visuelles employées par les conducteurs pour planifier leur trajectoire en courbe.

Lors d'une expérimentation, ils font conduire à des sujets, un véhicule équipé d'un dispositif pour enregistrer l'angle au volant, et d'une caméra pour enregistrer la direction du regard des conducteurs. Ils s'aperçoivent que les angles de direction du regard et de direction de lacet du véhicule évoluent de façon corrélée (*Figure 28*). De plus, en analysant la dispersion des points de fixation, on s'aperçoit que les conducteurs fixent, pendant 80% de la durée expérimentale, le "tangent point".

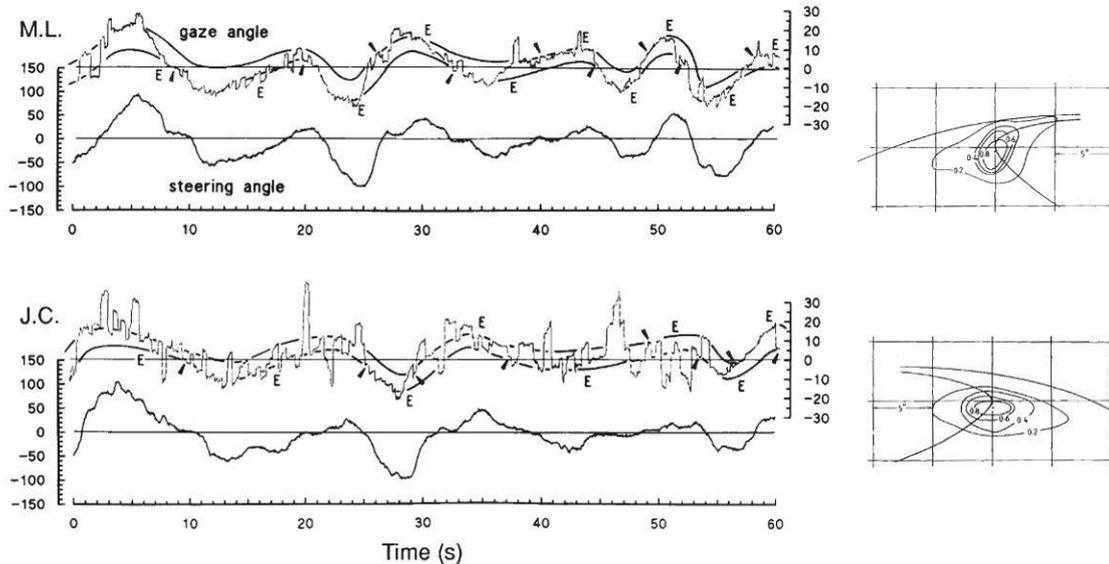


Figure 27 : A gauche : enregistrements pour deux sujets lors d'une tâche de conduite, représentant l'évolution des angles de direction du regard et de lacet du véhicule. On voit que pour les deux sujets, les deux courbes sont parfaitement superposables, suggérant que les conducteurs regardent dans la direction où ils tournent le volant. A droite : représentation de la densité de répartition des points de fixation du regard. On voit que les conducteurs ont tendance à fixer le point tangent au bord courbe de la route. (Land & Lee, 1994)

Afin d'expliquer ce comportement, les auteurs suggèrent que le "tangent point" fournit une mesure très facile de la courbure d'un virage. En effet, en connaissant l'angle entre la direction du regard et la direction de lacet du véhicule, il est très facile de déduire la courbure de la route, par quelques règles trigonométriques de base. D'après les résultats de cette expérimentation, c'est probablement le calcul fait par notre cerveau pour évaluer l'évolution de la courbure d'un virage. En outre, l'angle mesuré par le "tangent point" semble être proportionnel à l'angle qui est appliqué au volant.

Dans une revue d'articles, (Land, 2001) suggère que le "tangent point" pourrait avoir une propriété supplémentaire qui le rend si intéressant. En effet, la zone au sol autour du "tangent point" est la seule zone du champ visuel où le flux visuel est stationnaire (Figure 29. D). C'est donc la seule zone où les yeux peuvent se reposer sans subir en permanence le réflexe opto-cinétique, propre à l'observation des flux visuels latéraux.

Cependant, (Wilkie & Wann, 2003) relativisent le rôle du "tangent point" dans la stratégie visuelle de prise de virage. D'après leurs expérimentations, le rôle du flux visuel extra-rétinien (vision périphérique), mais également du gradient de vitesse (mesurable sur la Figure 29 par la différence de longueur des lignes), jouent également un rôle de tout premier plan dans la perception d'une trajectoire courbe. Ces indices participent à la perception de la courbure de notre trajectoire, suivant des pondérations qui peuvent varier en fonction des conditions d'efficacité de chaque indice. Par exemple, en fonction de la texture du sol, ou de l'éclairage de la route, le gradient de vitesse des différents points du champ visuel peut être difficilement perceptible.

Dans ce cas, il sera accordé plus de poids aux indices issus du flux visuel extrarétinien et du "tangent point".

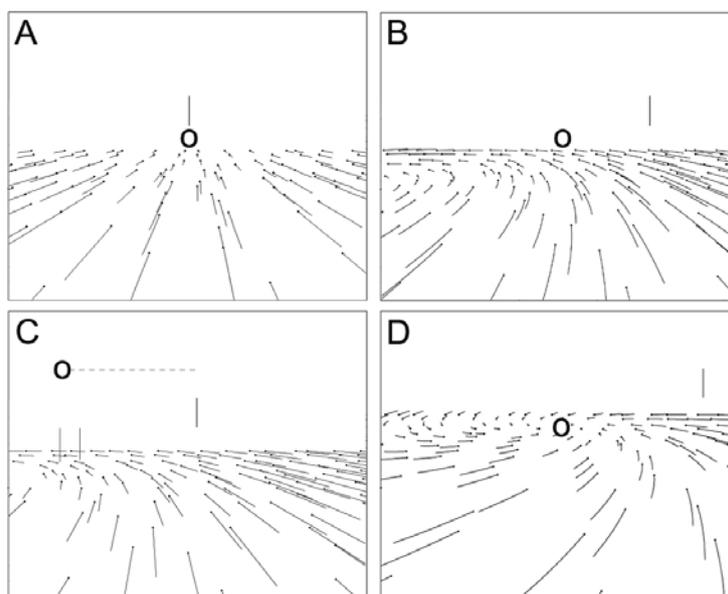


Figure 28 : Schémas du flux rétinien dans différentes conditions de déplacement et d'observation. - **A** : Le sujet se déplace droit devant et regarde dans la même direction. Le flux visuel est rectiligne et converge vers le point de fixation du regard. - **B** : Le sujet se déplace droit devant et regarde sur la gauche. La direction du regard forme un angle avec la direction de déplacement. A gauche du point de fixation, le flux visuel se courbe. - **C** : Le sujet se déplace en tournant sur la gauche et regarde droit devant. On observe le même flux rétinien qu'en B et C. - **D** : Le sujet se déplace en ligne droite, tout en fixant un point au sol sur la gauche de la direction de déplacement. On observe qu'autour du point de fixation (représenté par un "o"), le flux visuel est stationnaire. Il a tendance à tourbillonner autour de ce point. (Wilkie & Wann, 2003)

Il n'en demeure pas moins que la méthode du "tangent point" reste naturellement employée 80% du temps en virage. Le fait que les conducteurs emploient inconsciemment cette méthode, nous incite à penser qu'elle est particulièrement efficace et précise, sans pour autant requérir une attention excessive de la part des conducteurs.

À titre d'exemple, (Kandil & al, 2009) comparent deux méthodes de suivi de trajectoire en voiture : la méthode du "tangent point" et celle du "gaze sampling". Cette dernière consiste à fixer des points successifs de la trajectoire à suivre. La perception du flux optique, permet alors de corriger un angle trop important au volant (survirage), ou un angle insuffisant au volant (sous-virage) (Figure 30). Les résultats de l'étude confirment que les conducteurs utilisent naturellement la méthode du "tangent point", ils n'ont pas recours d'eux-mêmes au "gaze sampling". Lorsqu'on les force à utiliser les deux méthodes, on observe que pour la condition "tangent point", les conducteurs ont une conduite plus fluide en termes de positionnement du véhicule en entrée de virage, et de stabilité de la position volant. Ces résultats conduisent les auteurs à conclure que la prise de virage est plus "fluide" en observant le "tangent point". Dans une étude ultérieure, (Kandil & al, 2010) vont plus loin en démontrant

que plus le virage est serré, moins la visibilité est bonne, plus les conducteurs ont recours à la méthode du "tangent point" pour estimer la courbure d'un virage.

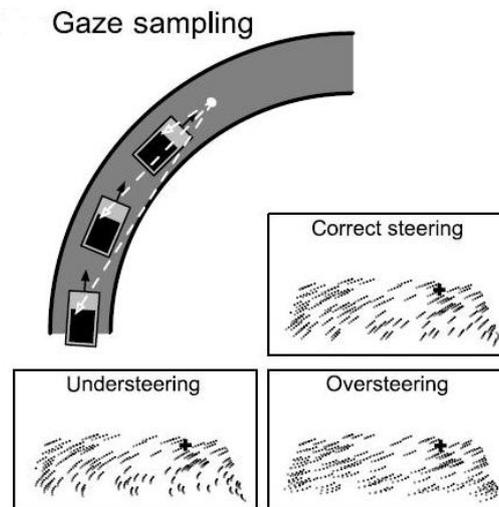


Figure 29 : La méthode du "gaze sampling" consiste à fixer des points successifs sur la trajectoire que l'ont doit suivre. Afin de corriger leur trajectoire, les conducteurs utilisent le flux optique pour savoir s'ils sont en situation de sous-virage, de survirage, ou de virage correct. (Kandil & al, 2009)

Pour contrebalancer cette théorie, certaines études relativisent l'unanimité de l'importance du rôle du "tangent point", dans le suivi d'une trajectoire courbe. C'est le cas de (Robertshaw & Wilkie, 2008) qui remarquent dans leur expérimentation que l'utilisation de la méthode du "tangent point" ne favorise pas particulièrement une prise en main plus précise du volant. Leurs résultats tendent plutôt à démontrer que les conducteurs tournent dans la direction où ils regardent. En fait, les conducteurs fixent leur regard sur des points de la route par lesquels ils veulent passer, ou qu'ils veulent inclure dans leur trajectoire. Ce qui accrédite la thèse du "gaze sampling".

6.3 Le contrôle moteur en conduite

6.3.1 Théorie des modèles internes

Modèle direct

Ce modèle consiste à prédire la position finale d'un membre du corps, en fonction d'une position initiale et d'une commande motrice donnée. C'est le système nerveux central qui convertit la commande motrice en prédiction de position du membre. Il est également en mesure de réaliser une prédiction sensorielle des informations qui seront perçues par le membre à la position finale, comme les angles articulaires ou l'élongation des muscles.

Modèle inverse

Le modèle inverse permet d'identifier la commande motrice à transmettre à un membre pour atteindre une position souhaitée, à partir de sa position initiale et des informations sensorielles perçues. Ce modèle est très utile pour la planification de trajectoire et le contrôle de mouvements. Il est utilisé en boucle ouverte, dans la mesure où il ne tient pas compte dans son estimation de moindre retour d'information sur les erreurs de prédiction réalisées.

Modèle interne de l'environnement

Pour finir, les modèles direct et inverse sont souvent associés à des modèles internes de notre environnement. Ces derniers sont enrichis par autant de connaissances acquises sur le fonctionnement des objets et systèmes manipulés, ainsi que leur comportement dynamique. Par exemple, nous possédons des modèles, pour prédire la trajectoire d'une balle lancée, ou encore la dynamique d'un véhicule, en fonction de la sollicitation du volant et des pédales.

6.3.2 Boucle ouverte, boucle fermée

Dans la pratique, le fonctionnement en boucle ouverte du modèle inverse est insuffisant pour réaliser une tâche de contrôle complexe, comme la conduite par exemple. Il n'en demeure pas moins que ce modèle reste utilisé dans toutes les tâches sensorimotrices du quotidien.

Dans une tâche de conduite, le système nerveux central utilise des modèles inverses pour estimer les angles successifs qu'il doit imposer au volant pour que le véhicule suive la trajectoire planifiée. Cependant, il reste à confronter ces estimations à la réalité, en tirant des leçons des erreurs de prédiction. Cette boucle de contrôle permet de corriger l'angle au volant afin de corriger les erreurs de trajectoire. Cette stratégie correctrice, principalement alimentée par un retour d'information visuelle dans le cas de la conduite, fonctionne en boucle fermée (*Cunningham & al, 2001*).

Comme nous l'avons dit, en conduite, la modalité visuelle joue un rôle important dans le suivi de trajectoire. Une expérimentation menée par (*Wallis & al, 2007*) met en évidence le fait qu'un conducteur n'est pas en mesure de réaliser une tâche de changement de file s'il n'a pas de retour visuel de son environnement (*Figure 31*). Les données de l'expérience suggèrent que la conduite automobile se caractérise par une série de positionnements du volant en boucle ouverte, dont chacun est mis à jour par un bref retour visuel, en boucle fermée. En d'autres termes, lorsqu'un conducteur prend un virage, il fait une série d'estimations de l'angle qu'il doit imposer au volant (boucle ouverte, sans feedback), chacune suivie d'un bref retour visuel et d'une légère correction d'angle au volant, pour converger vers la trajectoire prédéfinie. En effet, lorsqu'il est demandé aux conducteurs de réaliser un changement de file, sans le moindre retour visuel, aucun n'est capable de le faire. Ils tournent le volant et le ramènent à sa position neutre, mais oublient systématiquement de dépasser la position neutre en tournant le volant dans le sens opposé, avant de le ramener à la position

neutre. Toutes ces opérations sont nécessaires pour accomplir un changement de file. Sans retour visuel, les conducteurs semblent ne se représenter, dans leur schéma mental, que la première moitié de la séquence. Cette première autoreprésentation du fonctionnement de la direction est utilisée pour faire une estimation, en boucle ouverte, de l'angle à appliquer au volant pour aborder la manœuvre de changement de file. C'est donc en boucle fermée, grâce au feedback visuel, que le conducteur corrige ses actions afin d'arriver au bout de la manœuvre sans sortir de la route. On parle d'adaptation visuo-motrice, dans la mesure où l'information visuelle permet de corriger le contrôle moteur du conducteur.

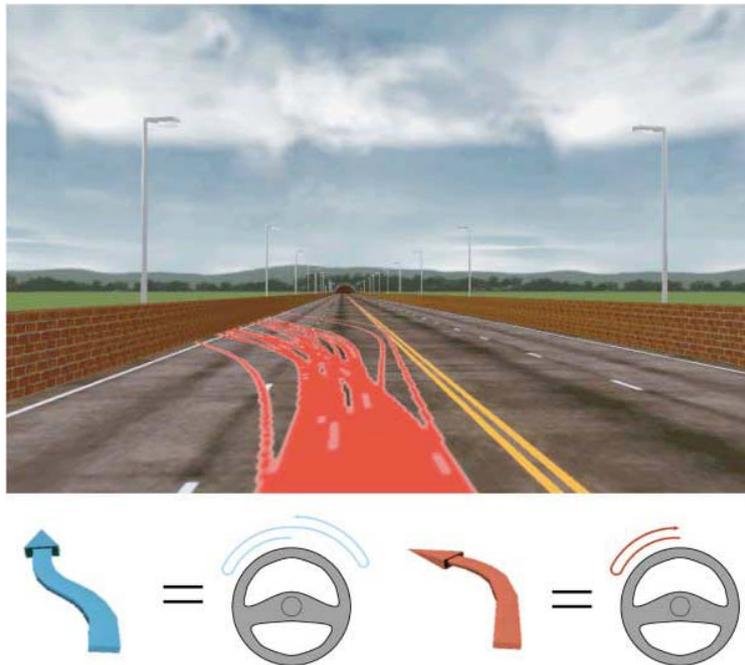


Figure 30 : Trajectoires de différents sujets pour une tâche de changement de file vers la gauche. Tous les conducteurs sortent de la route lorsqu'ils sont privés de feedback visuel. Ils tournent le volant une première fois, puis le ramène à la position neutre (cinématique du volant en rouge), mais oublient systématiquement de redresser la trajectoire pour revenir dans l'axe de la route (cinématique du volant en bleu). (Wallis & al, 2007)

6.3.3 Stratégies d'adaptation sensorimotrice

Si l'on se place dans le cadre d'une tâche de pointage ou de suivi de trajectoire, mettant en jeu un contrôle visuo-moteur de la main. Nous savons que notre système nerveux central convertit dans un premier temps les coordonnées de la position visuelle de la main dans un référentiel égo-centré (en angles articulaires, en élongation des muscles et des tendons...) afin que celle-ci contribue à améliorer la perception purement proprioceptive de la main (Wolpett & al, 1995 ; Goodboy & al, 1999). Dans ce processus, la vision participe à la perception que nous avons des angles formés entre les différents segments du bras jusqu'à l'épaule, origine du référentiel égo-centré utilisé. Lorsque le retour visuel est altéré, les erreurs de trajectoire augmentent, en raison d'une mauvaise estimation de la position de la main. Cependant, très

rapidement, les mécanismes d'adaptation sensorimotrice permettent de converger de nouveau vers une trajectoire menant à la cible identifiée. De nombreux travaux ont montré que nous sommes capables, dans une certaine mesure, de nous adapter à des modifications du "mapping" visuo-moteur, engendrées le plus souvent par l'introduction d'une perturbation sur le retour visuel (*Welch, 1986 ; Flanagan & Rao, 1995*). Quelles sont les stratégies qui nous permettent d'accomplir cette adaptation sensorimotrice ?

Modulation d'impédance

Cette stratégie "grossière" consiste à augmenter l'impédance des bras par co-contraction des muscles antagonistes. Le raidissement des bras permet d'en améliorer la stabilité et de les rendre plus robustes aux perturbations extérieures. D'après (*Gribble & al, 2003*), la co-contraction des bras décroît lorsque la cible à atteindre augmente, donc lorsque l'exigence de précision de la tâche diminue. Ce résultat laisse penser que dans une tâche de manipulation d'outil (quel que soit la nature du mouvement effectué), la modulation d'impédance serait une stratégie efficace pour limiter l'effet des perturbations extérieures. Elle permettrait en outre d'améliorer quasi-instantanément la précision du mouvement (*Hogan, 1984*).

Cette stratégie semble également intervenir dans la conduite automobile. D'après des mesures d'électromyographie réalisées sur les bras de conducteurs lors d'une tâche de simulation de conduite, (*Pick & Cole, 2006, 2007*) concluent que les sujets semblent avoir régulièrement recours à la co-contraction des muscles antagonistes pour raidir les bras lorsqu'ils tournent le volant ou qu'ils le maintiennent en position.

Modèles internes

Cette stratégie s'appuie sur des représentations du monde qui nous entoure, et de son fonctionnement. Nous avons tous constitué, grâce à notre faculté d'apprentissage, une multitude de modèles internes qui répertorient le fonctionnement des outils que nous manipulons couramment. Si l'on prend l'exemple de la conduite d'un véhicule, les conducteurs tiennent compte inconsciemment des caractéristiques dynamiques de leur véhicule. Ils ont recours à un modèle interne de la conduite pour prédire la trajectoire, en fonction de leurs actions sur le volant et les pédales.

C'est l'apprentissage qui permet d'alimenter nos modèles internes. Cette faculté permet d'optimiser la performance de réalisation d'une tâche en présence de perturbations. C'est l'observation faite par (*Lackner & DiZio, 2005*) au cours de deux expérimentations : la première consiste en une tâche de pointage, dans laquelle les sujets sont soumis à une rotation du corps autour de son axe. La deuxième, également une tâche de pointage, est réalisée à l'aide d'un bras haptique, permettant d'imposer une force perturbatrice aux mouvements des sujets.

Il en ressort que la performance de pointage se dégrade lorsque la force de Coriolis entre en action, et qu'il suffit de 40 essais d'apprentissage pour retrouver la performance de départ. Lorsque la force de Coriolis est annulée, la performance de

pointage se dégrade à nouveau : c'est l'aftereffect⁹ (*Figure 32. A*). Mais cette fois la performance initiale est retrouvée après 20 essais à peine. Pour le bras haptique, 90 essais après l'introduction d'une force perturbatrice des mouvements de la main, la performance de pointage n'atteint toujours pas le niveau de performance initiale. Par contre, à partir du moment où la force perturbatrice est supprimée, on constate une vingtaine d'essais avec un phénomène d'aftereffect avant de retrouver la performance initiale. Cet aftereffect est inexistant si les sujets réalisent la tâche de pointage avec la main, après avoir utilisé le bras haptique avec la force perturbatrice (*Figure 32. B & C*).

L'apprentissage permet donc une auto-calibration adaptative, plus ou moins efficace, du contrôle moteur en fonction de la perturbation imposée. Dans le cas d'une perturbation haptique de la main pendant l'accomplissement d'une tâche de pointage, il semblerait que le modèle interne constitué pour l'utilisation du bras haptique soit utilisé uniquement lors de la manipulation de ce dispositif. Lorsque la main est utilisée directement, sans avoir recours à un bras à retour d'effort, la calibration initiale du contrôle moteur reprend le pas quasi-instantanément. Les sujets semblent se débarrasser du modèle interne du bras haptique pour le remplacer par un modèle interne des mouvements propres.

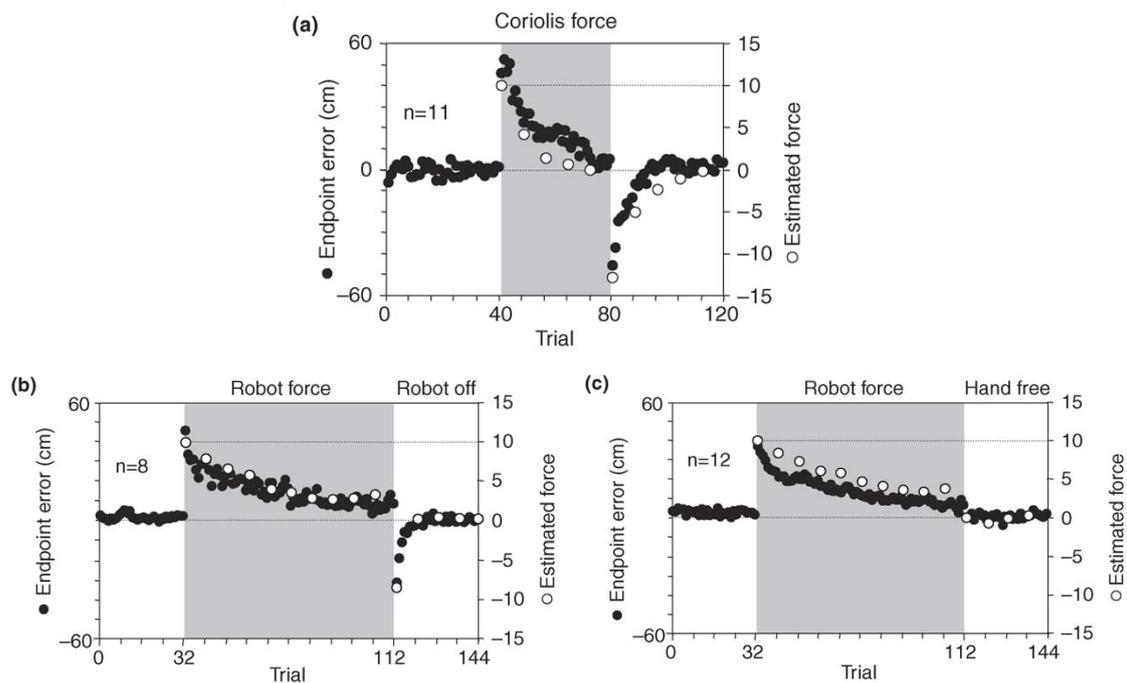


Figure 31 : - *A* : erreurs de pointage avant, pendant, et après exposition des sujets à une force de Coriolis. - *B* : erreurs de pointage avant, pendant, et après l'application d'une force perturbatrice à la main des sujets par l'intermédiaire d'un bras à retour d'effort. - *C* : mêmes conditions qu'en *B*, mais après la force perturbatrice, les sujets réalisent la tâche de pointage à main nue. (Lackner & DiZio, 2005)

⁹ Aftereffect : persistance d'un mapping sensorimoteur après une longue exposition.

Combinaison de stratégies

En réalité, dans la pratique, les deux stratégies sont utilisées en parallèle avec des pondérations variables en fonction de la nature de la tâche demandée. Lorsqu'un utilisateur est confronté à l'utilisation d'un système dont il ne connaît pas le fonctionnement, la stratégie de co-contraction est instantanément utilisée, car elle garantit une plus grande robustesse aux perturbations extérieures (*Morasso & Sanguinetti, 2003*).

Avec l'apprentissage, cette stratégie laisse progressivement place à l'utilisation de modèles internes, au fur et à mesure de leur élaboration. Les mouvements deviennent alors plus précis et plus fluides, car ce rééquilibrage s'accompagne d'une diminution progressive de la co-contraction des muscles (*Gribble & al, 2003*). Cette "stratégie compensatoire" se base sur un apprentissage, par le système nerveux central, de l'environnement dynamique avec lequel nous interagissons, afin de produire une commande motrice qui anticipe le comportement de ce dernier (*Morasso & Sanguinetti, 2003*).

6.4 Conclusion

Nous avons vu que les conducteurs utilisent des indices visuels, tels que le "tangent point", le "gaze sampling", la vision périphérique, le flux rétinien, ainsi que son gradient de vitesses. Ces indices leur permettent d'une part d'alimenter un modèle inverse en boucle ouverte, couplé à un modèle interne du fonctionnement du véhicule, pour estimer l'angle à appliquer au volant afin de suivre une trajectoire. D'autre part, ils fournissent un retour d'information en boucle fermée, permettant de corriger les erreurs de prédiction réalisée par la boucle ouverte.

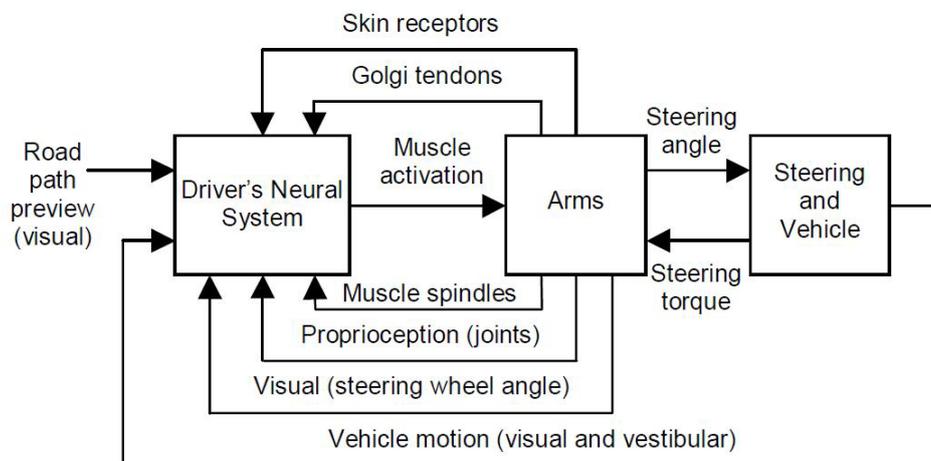


Figure 32 : Modèle des interactions sensorimotrices impliquées dans une tâche de conduite. (*Pick & Cole, 2003*)

Pour servir de support à une synthèse, nous reprenons ici un modèle proposé par (*Pick & Cole, 2003*), qui décrit les interactions sensorimotrices propres à une tâche de conduite (*Figure 33*). Dans un premier temps, en fonction des indices visuels de la route, le conducteur planifie une trajectoire à suivre, ainsi que les actions à effectuer au volant pour y parvenir. Ensuite, une boucle fermée s'engage, dans laquelle le système nerveux central intègre cette trajectoire planifiée ; la dynamique du véhicule par les indices visuels et vestibulaires de la conduite ; l'état de ses bras et les informations de retour d'effort transmises par le volant grâce à une multitude d'indices haptiques, visuels et proprioceptifs. Il en ressort une commande motrice qui activera le comportement des bras du conducteur afin de mettre à jour l'angle au volant. Dans ce modèle, seule la stratégie des modèles internes n'est pas représentée.

Ici, les bras sont considérés comme un système indépendant, dans la mesure où ils possèdent une inertie et un temps de réponse pour le système nerveux central. C'est à travers ses bras que le conducteur pourra appliquer simultanément la stratégie de modulation d'impédance par contraction des muscles, et la stratégie des modèles internes, consistant à prendre en compte, dans la production de la commande motrice, un schéma mental de la dynamique du véhicule. Cette dernière permet d'anticiper les effets des actions au volant sur la trajectoire, et de prendre en compte cette information pour produire la commande motrice nécessaire. Cela vaut également pour les éventuelles perturbations qui viendraient modifier le fonctionnement du véhicule. Par exemple, les conducteurs ont conscience que leur distance de freinage est plus grande sur sol mouillé. Ils adaptent en conséquence leurs modèles internes pour intégrer ce changement de propriété. Ils ont ainsi tendance à freiner moins fort, dès la sollicitation de la pédale.

7 Les systèmes embarqués

7.1 Généralités

Ces dernières années, l'équipement des véhicules en systèmes embarqués, de toutes sortes, s'est enrichi chez tous les constructeurs automobiles, pour répondre essentiellement à trois besoins distincts :

- Les progrès technologiques
 - ↳ Traitement numérique, fiabilité, coût...
- Les contraintes réglementaires
 - ↳ Nouvelles fonctions exigées, nouvelles normes, sécurité...
- L'aspect marketing
 - ↳ Demande toujours plus grande du client, démarquage de la concurrence...

Les systèmes embarqués présents dans l'habitacle du véhicule concernent des aspects très différents de la conduite. Ils sont utilisés pour répondre à des besoins allant du confort des habitants du véhicule à leur nécessaire sécurité. Les enjeux du développement des systèmes embarqués pour l'automobile sont nombreux, car plusieurs pré-requis technologiques ont commencé à être suffisants il y-a à peine dix ans. Les principaux étant :

- Le temps de réponse : celui-ci doit être de l'ordre du "temps réel", surtout pour des applications de sécurité.
- La puissance de calcul : la stratégie employée par les systèmes embarqués peut être riche et complexe, donc exiger des calculs lourds.
- Le flux d'information : les systèmes embarqués étant connectés entre eux, la simplification et la diminution du nombre de connections (donc de câbles) est un enjeu majeur pour les coûts et la sécurité. Bosch, un important équipementier automobile, a fourni la solution dans le milieu des années 80 avec le bus CAN. L'entreprise allemande a défini le protocole et autorisé de nombreux autres fabricants à développer des composants compatibles CAN. Avec le protocole CAN, les contrôleurs, capteurs et actionneurs communiquent entre eux sur deux câbles à une vitesse pouvant aller jusqu'à 1Mbits/s.
- La Sureté de fonctionnement : elle traduit la confiance que l'utilisateur peut placer dans le système. Elle permet également de quantifier les défaillances et les pannes éventuelles qui peuvent survenir, afin de déterminer des procédures en cas de fonctionnement dégradé des systèmes embarqués.
- La compatibilité des infrastructures : concerne les applications de télématique ayant un lien avec des systèmes extérieurs au véhicule, comme la téléphonie, la navigation, ou la communication inter-véhicules.

Ces avancées ont ainsi permis la création de systèmes embarqués dont les fonctionnalités balayent un champ d'applications très large. En voici quelques exemples :

- Commandes électriques :
 - Accélérateur
 - Freinage ABS
 - Boîte de vitesse
 - Direction
- Confort :
 - Accès mains libre
 - Climatisation automatique
 - Essuie glace automatique
 - Phares orientables
- Sécurité :
 - Airbag intelligent
 - Pré-crash
 - Appel d'urgence
 - Contrôle de trajectoire ESP
- Télématique :
 - Navigation
 - Téléphonie
 - Assistance et télé-diagnostique
 - Internet

La multiplication de ces systèmes embarqués peut poser des problèmes de sécurité si leur ergonomie n'est pas optimisée. En effet, lorsqu'ils sont passifs, ils sollicitent d'autant plus l'attention du conducteur durant la conduite. Lorsque les systèmes sont autonomes, ils ne doivent pas être trop intrusifs dans la stratégie de conduite, au risque d'une mauvaise compréhension du comportement du véhicule par le conducteur.

Plusieurs questions de recherche se posent lors de la conception et de la validation de chaque système embarqué. Il convient de faire des essais en incluant le conducteur dans la boucle pour vérifier la qualité de l'interaction homme-machine. L'utilisation de la réalité virtuelle est particulièrement intéressante lors de ces phases de validation, car elle permet un gain de temps et de budget non négligeables pour ce type d'applications. De surcroît, le prototypage des systèmes étant simplifié, leur validation est réalisable très en amont du processus de conception, dès la phase de spécification du projet. Pour cela, il est nécessaire de trouver des méthodes d'analyse pour traiter la somme importante de données recueillies pendant les simulations (*Popieul & al, 2007*).

7.2 Workload en conduite

Le workload en conduite traduit la notion de "sollicitation d'attention" du conducteur. La simple action de conduire entraîne une augmentation du workload. En effet, le conducteur doit analyser la trajectoire, l'état de la route, le trafic environnant et exécuter des manœuvres à l'aide des différents organes de contrôle du véhicule en réaction à une situation de conduite. Ce workload de base, inhérent à toute tâche de conduite, dépend de plusieurs facteurs, propres à chaque conducteur : âge, expérience,

fatigue... à cela peuvent s'ajouter plusieurs sollicitations supplémentaires, qui ont pour effet un accroissement du workload conducteur : GPS, radio, téléphone, conversation avec un passager...

Il existe plusieurs méthodes pour quantifier le workload en conduite, comme la détection de stimuli en vision périphérique, la détection de stimuli auditifs, les tâches motrices... s'il fallait choisir, l'efficacité supérieure de la méthode de détection de stimuli en vision périphérique a été démontrée dans plusieurs études (*Harms & Patten, 2003 ; Martens & Van Winsum, 2000*).

Il n'en demeure pas moins que les tâches de détection sollicitant d'autres modalités (auditive, haptique) fournissent des résultats sensiblement équivalents en termes de temps de détection. D'après une étude de (*Merat & al 2008*), en contexte de conduite le temps de réaction du conducteur pour réaliser une tâche de détection augmente en moyenne de 200 ms en présence d'IVIS (In-Vehicle Information Systems). Il n'apparaît aucune différence significative que la modalité sollicitée par la tâche de détection soit visuelle, auditive ou haptique. Ce résultat suggère que la performance de détection dépend des ressources attentionnelles centrales (central attentional resources) et n'a pas de spécificité, quelle que soit la modalité sollicitée. On peut également citer une approche qui consiste à la mesure objective et subjective du workload, en analysant la performance de conduite (*Girard & al, 2007*).

7.2.1 Workload et expérience du conducteur

Dans une étude menée par (*Patten & al, 2006*), il a été démontré, à l'aide d'une tâche de détection en vision périphérique, que chez les conducteurs ayant une plus grande quantité de kilomètres roulés à leur actif, la conduite sollicite moins l'attention pendant la conduite. Ils détectent en moyenne 250 ms plus tôt les stimuli qui leurs sont présentés par rapport aux conducteurs moins expérimentés. De plus, leurs performances de conduite sont meilleures. Ceci suggère que l'accumulation d'expérience de conduite permet de réduire la quantité de ressources attentionnelles sollicitées chez les conducteurs, ce qui leur permet d'accorder plus d'attention à une tâche secondaire, sans dégrader leur performance de conduite. On constate également, en présence d'une grande ou d'une faible complexité du trafic, que les conducteurs non expérimentés présentent un temps de réaction élevé, tandis que les conducteurs expérimentés voient leurs performances de détection se rallonger légèrement avec l'augmentation de la complexité du trafic (*Figure 34*).

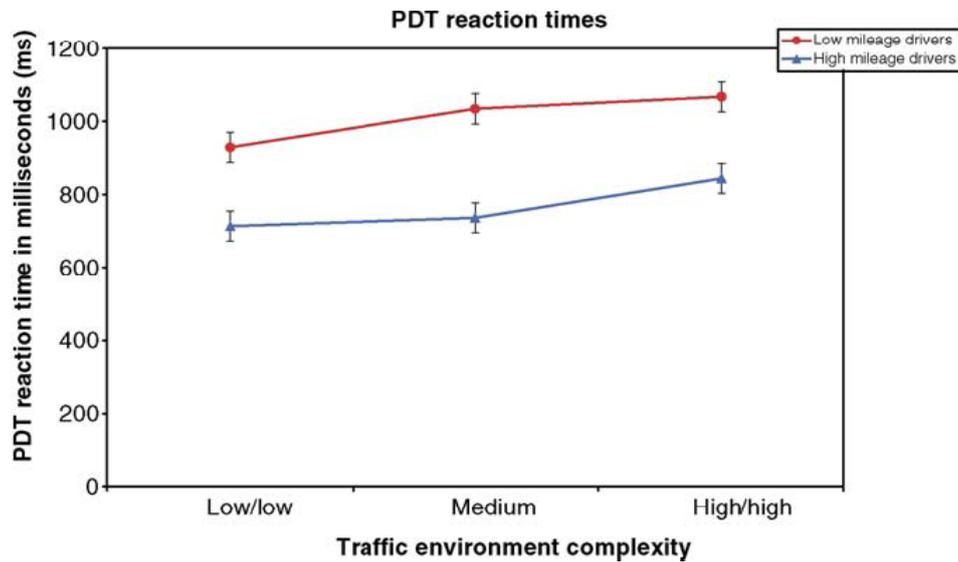


Figure 33 : Courbes représentant le temps de réaction des conducteurs pour des tâches de détection en vision périphérique (PDT = Peripheral Detection Task), dans différentes conditions de complexité du trafic. En rouge, les conducteurs non expérimentés. En bleu, les conducteurs expérimentés. (Patten & al, 2006)

7.2.2 Workload et tâche secondaire

Une autre étude, menée sur route par (Recarte & Nunes, 2003), utilisant une méthode de détection et de discrimination de stimuli visuels lumineux pour mesurer le workload du conducteur, conclut qu'en présence de tâches auditives secondaires de mémorisation et de conversation au téléphone ou avec un passager ; la perception visuelle est détériorée. Cette détérioration viendrait davantage d'une détection tardive du stimulus visuel, le temps de réaction n'étant pas affecté.

Dans le cas particulier des téléphones portables, il est admis que leur utilisation affecte particulièrement le workload des conducteurs (Ma & Kaber, 2005). D'ailleurs, d'un point de vue strictement légal, l'interdiction de l'utilisation des téléphones portables s'accompagne d'une lourde sanction en cas de transgression de cet interdit. Les conducteurs sont invités à utiliser un kit mains-libres s'ils veulent se servir de leur téléphone pendant la conduite, mais de sérieux doutes ont été émis concernant l'innocuité du kit mains-libres, dans la mesure où le danger viendrait plus de la distraction engendrée par la conversation téléphonique, que de la contrainte de conduire d'une seule main. En effet, si on compare l'augmentation du workload lors de l'utilisation du téléphone portable avec ou sans kit mains-libres (Figure 35), on s'aperçoit que dans les deux conditions, le workload augmente significativement par rapport à la condition de référence (sans téléphone). En revanche, la complexité de la conversation à laquelle est soumis le conducteur, paraît avoir un impact fort sur sa distraction (Patten & al, 2004).

Dans une étude subjective basée sur un questionnaire, (Matthews & al, 2003) trouvent des différences significatives de workload conducteur entre l'utilisation d'un téléphone portable classique, et l'utilisation d'un téléphone équipé d'un kit mains

libres. Il semble que le kit mains libres permette une communication qui interfère moins avec les exigences cognitives d'une tâche de conduite.

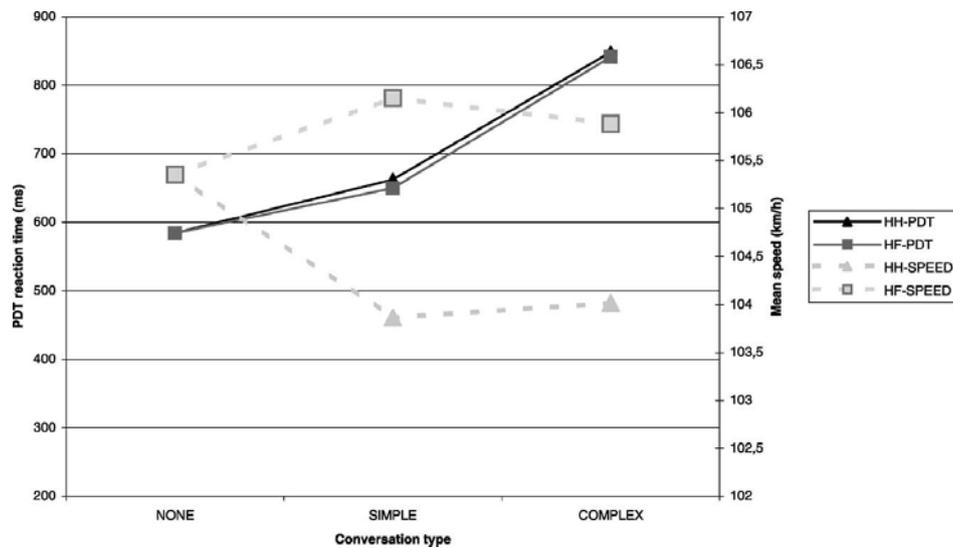


Figure 34 : Courbes représentant les temps de réaction obtenus par une PDT lors d'une conduite en téléphonant, avec utilisation d'un kit main-libres (HF = hands-free), et sans (HH = handheld). Deux types de conversations ont été évalués : "simple" et "complexe". Les courbes en pointillés représentent les moyennes de vitesses pour les deux conditions HF et HH. (Patten & al, 2004)

7.2.3 Workload et complexité du trafic

La complexité du trafic est un autre paramètre ayant un impact sur le workload du conducteur. Plusieurs études se sont penchées sur ses effets (Nunes & al, 2005 ; Patten & al, 2006 ; Jahn & al, 2005). Il en ressort que la complexification du trafic, couplée à d'autres paramètres, comme le manque d'expérience du conducteur, ou une vitesse excessive de roulage, entraîne une augmentation significative du workload conducteur. Ce dernier se manifeste souvent par une dégradation des capacités perceptives visuelles des conducteurs.

7.3 Interfaces visuelles d'assistance à la conduite

Parmi les tâches secondaires susceptibles de solliciter l'attention des conducteurs, les systèmes de navigation constituent un équipement typiquement source d'augmentation du workload conducteur. De nombreuses études ont démontré, à l'aide d'une méthodologie utilisant une tâche de détection en vision périphérique, que les dispositifs de navigation n'altèrent pas significativement la performance de conduite en centre ville (Dingus & al, 1997 ; Harms & Patten, 2003 ; Srinivasan & Jovanis, 1997). Il n'en demeure pas moins qu'il se produit une augmentation du workload conducteur, se traduisant par une baisse de la performance de détection des

stimuli périphériques et par une augmentation significative du temps de réaction lié à cette détection. Ce résultat est amplifié lorsque la complexité du trafic augmente (*Jahn & al, 2005*). Par ailleurs, la dimension d'affichage de l'écran de navigation ne paraît pas avoir d'impact sur le workload des conducteurs (*Figure 36*).

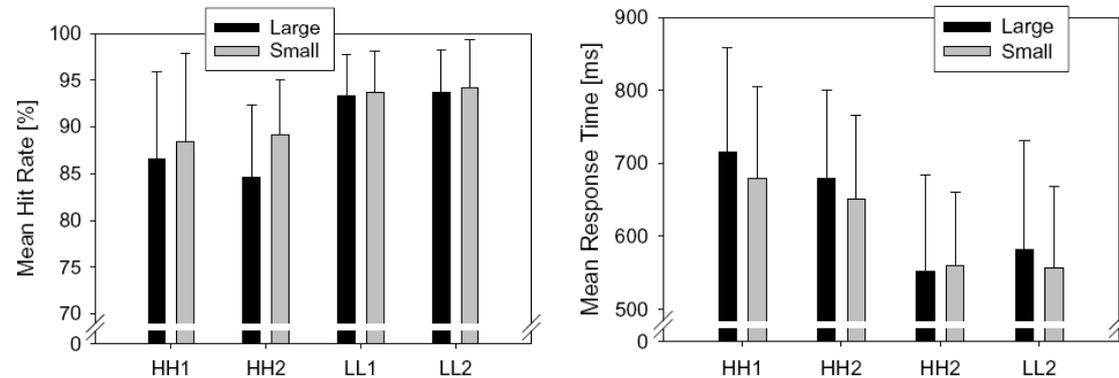


Figure 35 : Courbes représentant les taux de détection des stimuli, ainsi que les moyennes des temps de réaction, pour des systèmes d'affichage de navigations large et étroit, sur des sections de route hautement et peu sollicitantes. (*Jahn & al, 2005*)

Quand à la position de l'écran dans l'habitacle, l'excentricité horizontale, par rapport à un axe vertical passant par le centre du volant, aurait moins d'influence, sur le workload visuel du conducteur, que l'excentricité verticale par rapport à la ligne d'horizon. En effet, d'après (*Wittmann & al, 2006*) lorsque les conducteurs déplacent le regard en partant de la ligne d'horizon vers le bas, en passant par l'axe du volant, le workload visuel croît avec une tendance exponentielle.

Afin de remédier à l'augmentation du workload visuel, et améliorer la sécurité des conducteurs, il est alors possible de communiquer des informations au conducteur par le biais d'autres modalités : les interfaces sonores par exemple peuvent être utilisées pour interagir avec un dispositif de navigation installé sur la console centrale du véhicule. L'expérience démontre que l'interface sonore est efficace mais pas aussi rapide d'utilisation, que l'interface visuelle. Une exception néanmoins, dans les cas de tâches courtes où les deux modalités sont comparables en termes de temps d'exécution d'une tâche de navigation dans un menu. Dans ce cas précis, il apparaît également que la performance de conduite augmente significativement avec la modalité sonore alors que la charge mentale perçue diminue. De plus, les utilisateurs rapportent un taux de satisfaction globalement plus élevé (*Sodnik & al, 2008*). Ces résultats ne sont pas étonnant, car l'attention portée à l'interface visuelle rentre en compétition avec l'attention visuelle que le conducteur porte à sa tâche principale : conduire en regardant la route. La distraction engendrée par l'interface visuelle laisse penser que l'interface sonore apporte une réelle valeur ajoutée, dans la mesure ces deux modalités sont suffisamment efficaces pour la tâche demandée.

7.4 Interfaces haptiques d'assistance à la conduite

7.4.1 Généralités : perception haptique du pied

Contrairement à la main, le pied n'a pas fait l'objet d'études nombreuses et approfondies, quant à sa perception haptique et ses performances sensorimotrices. Par chance, dans ce domaine, les capacités du pied et de la main paraissent très proches. En effet, (*Hajnal & al, 2007*) démontrent en soumettant des sujets à des tâches similaires, faisant intervenir le pied et la main, que ces deux organes possèdent le même degré de différenciation (soit le même *JND*) pour la perception haptique. Malgré leurs différences neuronales et anatomiques, les membres supérieurs et inférieurs paraissent accomplir leurs fonctions perceptives haptiques avec la même facilité.

Ces résultats sont corrélés par les travaux de (*Mugge & al, 2009*). Dans leur étude, les sujets doivent minimiser des perturbations imposées à une pédale par pression du pied. Ils réalisent une tâche de maintien en position et une tâche de stabilisation en effort. Afin d'assurer le maintien en position de la pédale, en présence de perturbations sur cette position, les sujets paraissent raidir la jambe par co-contraction des muscles antagonistes. A l'inverse, lors d'une tâche de stabilisation d'effort, les sujets paraissent plutôt relâcher les muscles de la jambe. Dès lors, il est tentant de penser que le pied peut indifféremment passer d'une tâche de maintien de position à une tâche de maintien d'effort, respectivement par excitation ou inhibition des muscles antagonistes de la jambe (*Abbink & al, 2004*). On reconnaît ici la stratégie de modulation d'impédance et celle des modèles internes, largement exposées pour comprendre le fonctionnement des membres supérieurs. Cette propriété a un intérêt certain dans les applications d'assistance à la conduite par l'intermédiaire d'un retour d'effort à travers les pédales du véhicule.

7.4.2 Application au suivi de véhicules

Les situations de suivi de véhicule, dans le cadre d'une conduite quotidienne, augmentent le risque encouru par les conducteurs. Une partie non négligeable des accidents de la route est due à une mauvaise détection, voire une mauvaise interprétation du comportement du véhicule qui se trouve devant nous dans la file. Bien sur, le risque d'accidents est encore plus important, lorsque le conducteur est soumis à une tâche visuelle secondaire.

Afin de mesurer cet impact, (*Summala & al, 1988*) ont réalisé une expérimentation pour mesurer la performance de détection des feux de stop par les conducteurs, en présence de tâches secondaires visuelles, localisées à différentes positions de l'habitacle du véhicule. Premier résultat, il semblerait que l'expérience du conducteur n'intervient pas dans leur performance de détection visuelle. Celle-ci est nettement dégradée de jour, lorsque le conducteur concentre sa vision sur le compteur de vitesses, au niveau du tableau de bord. La performance de détection des feux de stop devient même nulle lorsque le conducteur doit observer une cible sur la

console centrale du cockpit. Par conséquent, d'après les auteurs, contrairement au suivi de trajectoire qui peut être assuré en partie par la vision périphérique du conducteur, le suivi de véhicule ne semble pas bénéficier de cette faculté.

Ce résultat met en évidence l'intérêt d'aider les conducteurs à surveiller les distances inter-véhiculaires par le biais d'un canal modal différent de la vision. Dans ce domaine, le choix de (Kuge & al, 2006) s'est porté sur la modalité haptique. Ainsi, un prototype roulant équipé d'une assistance active au suivi inter-véhiculaire, composée d'une pédale d'accélérateur à retour d'effort et d'une assistance active au freinage, a permis d'améliorer significativement la performance de suivi des conducteurs (diminution de l'écart-type de la distance inter-véhiculaire), mais également d'alléger leur charge attentionnelle. Le système a permis de diminuer la fréquence avec laquelle les conducteurs suivent la voiture de devant de trop près. De plus, le conducteur assisté détecte plus facilement les changements de distance inter-véhiculaire lorsqu'ils suivent les véhicules de loin, et cela sans augmenter le workload. Pour finir, la réponse du conducteur est plus rapide dans le cas où le véhicule de devant décélérerait.

Pour aller plus loin, dans une étude de suivi de véhicule, (Mulder & al, 2008) analysent l'utilisation d'une pédale d'accélérateur à retour d'effort pour assister le conducteur dans la conservation d'une distance inter-véhiculaire constante. Mais cette fois, deux conditions de retour d'effort sont évaluées : un effort constant et effort de type raideur (proportionnel à la distance inter-véhiculaire). L'expérimentation démontre une amélioration de la performance de suivi des véhicules lorsque les sujets reçoivent pour consigne de respecter une durée donnée entre leur véhicule et le véhicule de devant. De plus, les auteurs constatent que l'activité de contrôle, i-e le workload des sujets, baisse significativement grâce à l'introduction de ce système d'assistance active. Cette baisse se traduit par une diminution de la variabilité de la position de la pédale d'accélérateur (Figure 37).

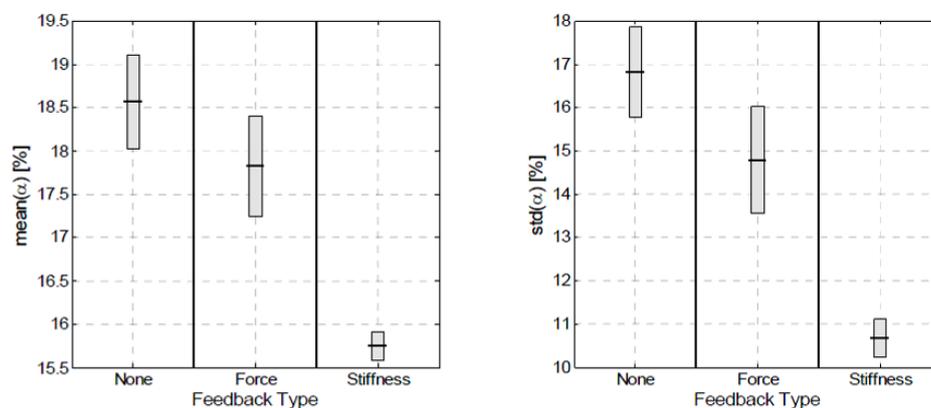


Figure 36 : Moyenne (à gauche) et écart-type (à droite) de la position de la pédale d'accélérateur, avec et sans assistance au suivi de véhicules. (Mulder & al, 2008)

Ce dernier résultat pourrait s'expliquer par le fait qu'une pédale d'accélérateur classique requiert des conducteurs une tâche de contrôle en position de la pédale. Même lorsqu'ils cherchent à maintenir une séparation en termes de durée entre deux

véhicules, leur tâche se résume à un contrôle en position de la pédale. Avec l'assistance haptique, la tâche se transforme en un exercice de contrôle en force, dont découle la position de la pédale. Ce n'est plus au conducteur de juger du positionnement de celle-ci, il se contente de satisfaire la consigne en effort, qui devient un indice supplémentaire de distance inter-véhiculaire. C'est d'ailleurs l'interprétation faite par (Mulder & al 2004). Ils constatent qu'en présence de l'assistance haptique, les conducteurs adoptent une stratégie qui consiste à maintenir un effort constant sur la pédale d'accélérateur. De plus, la condition où le retour d'effort est proportionnel à la distance inter-véhiculaire fournit de meilleures performances (Figure 38), en termes de temps de réaction visuel, que le retour d'effort constant (actif seulement en dessous d'un certain seuil de distance inter-véhiculaire).

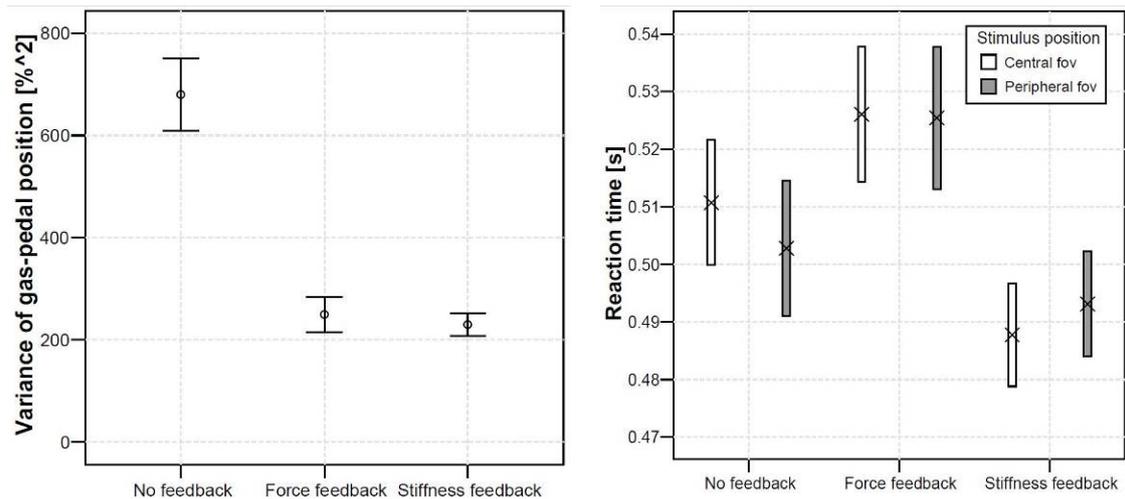


Figure 37 : A gauche : Mesure de l'activité de contrôle, exprimée par la variance de la position de la pédale d'accélérateur, pour une condition sans retour d'effort, et deux conditions avec des retours d'effort différents : "constant" et "raideur". A droite : Moyenne des temps de réaction visuelle dans le champ central et périphérique, pour les trois conditions précitées. (Mulder & al, 2004)

7.4.3 Application à la limitation de vitesse

Dans la littérature, un équipement communément appelé AAP (Active Accelerator Pedal), permet d'appliquer une force de résistance au pied du conducteur, par l'intermédiaire de la pédale d'accélérateur, lorsque le système détecte un dépassement des limitations de vitesses. Deux études portant sur l'utilisation de l'AAP ont été menées en conditions réelles et à grande échelle (plus de 280 participants). Ce système étant adaptable sur n'importe quel véhicule, les participants ont pu conserver leur voiture habituelle, de même que leurs habitudes de déplacement pendant plusieurs mois d'expérimentation. En présence du système AAP, on observe une amélioration significative du respect des limites de vitesses, mais également une réduction de la vitesse moyenne et des variations de vitesse. Les émissions polluantes ont diminué significativement. Le tout sans augmenter les temps de parcours. Dans l'ensemble, le concept de l'AAP est évalué positivement par les conducteurs, mais la

volonté de payer pour un tel système est plus faible que pour d'autres dispositifs d'assistance plus classiques. Les conducteurs trouvent que le système est utile mais pas satisfaisant car il aggrave la pression émotionnelle déjà ressentie lors d'une tâche de conduite. Et cela, même s'ils trouvent que le système a des effets positifs sur la limitation de vitesse et la sécurité. L'effet le plus unanimement partagé par les utilisateurs est que le système AAP réduit significativement les risques de recevoir une amende pour excès de vitesse (Várhelyi & al, 2004 ; Adell & al, 2008).

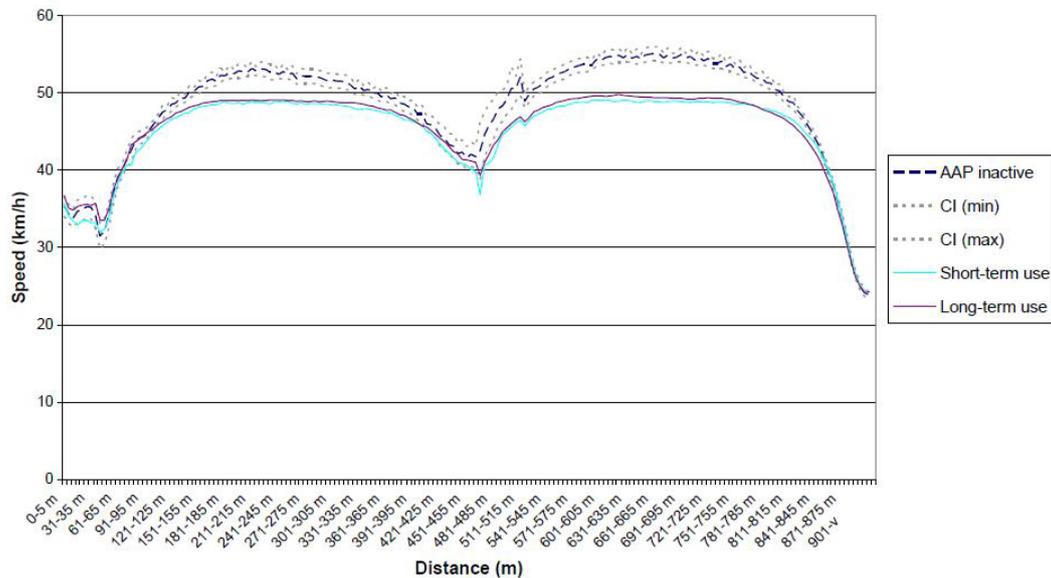


Figure 38 : Profils de vitesses moyennes en ville. On constate une baisse de la vitesse moyenne, même après une courte utilisation du dispositif AAP. On note également un meilleur respect des limitations de vitesse (50 km/h). (Várhelyi & al, 2004)

A cela s'ajoutent les conclusions d'une étude menée par (Vlassenroot & al, 2007), qui crédite l'AAP d'une augmentation du confort de conduite, ainsi qu'une réduction significative des dépassements de vitesses (Figure 39). Pour aller plus loin, l'étude explique la réaction positive des conducteurs à un tel dispositif d'assistance : ceux qui ont tendance à faire beaucoup d'excès de vitesse voient leur moyenne de vitesse diminuer, tandis que les conducteurs qui ont l'habitude de conduire lentement voient leur moyenne augmenter. Dans les deux cas, le système AAP permet aux conducteurs de tendre vers la vitesse limite autorisée, sans la dépasser. Par extrapolation, il serait intéressant d'envisager que ce dispositif puisse contribuer à réguler et à fluidifier un flux de véhicules qui en seraient équipés, en harmonisant les comportements des conducteurs, qu'ils aient tendance à rouler vite ou lentement.

Partie 3

Expérimentations

8 Comparaison d'assistance visuelle et haptique à l'éco-conduite

8.1 Objectifs

Il est possible d'assister les conducteurs à l'éco-conduite, par l'intermédiaire d'un dispositif d'assistance dans le cockpit du véhicule, qui fournirait une information sur l'éco-performance réalisée pendant la conduite. La modalité perceptive du retour d'information peut aussi bien être visuelle, sonore, ou haptique.

Dans cette étude, nous cherchons à évaluer l'efficacité des conseils d'éco-conduite traditionnels, prodigués pour réduire les quantités d'émissions polluantes. Nous cherchons également à évaluer les améliorations potentielles supplémentaires que pourraient apporter des dispositifs d'assistance à l'éco-conduite, qu'ils soient visuel ou haptique. Enfin, nous voulons savoir comment les conducteurs réagiraient à une stimulation sous la forme d'un retour d'effort à travers la pédale d'accélérateur. En effet, un tel vecteur pourrait paraître trop intrusif dans le contrôle du véhicule.

8.2 Bibliographie

8.2.1 Assistance par retour visuel

De nos jours, la plupart des automobiles sont équipées d'un affichage digital de la consommation instantanée, d'un GPS, d'un écran d'autoradio... Les simulateurs de conduite sont un moyen efficace d'étudier l'impact de ces informations visuelles sur l'attention visuelle et la performance des conducteurs (*Reimer & al, 2010 ; Wang & al, 2010*). Même si l'attention visuelle des conducteurs reste principalement focalisée sur la route, le fait de les soumettre à l'utilisation d'une assistance par affichage visuel, semble détériorer les performances de détection visuelle (*Recarte & al, 2003*). De plus, lorsque les conducteurs observent un dispositif d'affichage dans la zone du compteur de vitesse, c'est à leur vision périphérique que revient la lourde tâche de surveiller la route. On observe alors une dégradation du contrôle de la trajectoire du véhicule et du maintien des distances inter-véhiculaires. Cette dégradation augmente quand l'affichage à observer est déporté sur la console centrale (au dessus du levier de vitesses) (*Summala & al, 1998*). D'une manière générale, une évaluation quantitative de la performance de détection visuelle, en fonction de la position de l'affichage, nous indique qu'une excentricité verticale, par rapport à la ligne d'horizon de la route, a un effet négatif supérieur à un écart horizontal, par rapport à l'axe du volant (*Wittmann & al, 2006*).

8.2.2 Assistance par retour haptique

La stimulation haptique des conducteurs à travers la pédale d'accélérateur, est un autre moyen d'apporter un retour d'information sur l'éco-performance instantanée du conducteur. De plus, l'une des grandes forces du système haptique humain est son aptitude à transmettre les informations très rapidement vers le cerveau, beaucoup plus rapidement que le système visuel (*Harrar & Harris, 2005*). L'équipementier automobile Continental a développé une pédale d'accélérateur à retour d'effort qui vibre pour prévenir les conducteurs du moment opportun auquel passer les rapports pour adopter une conduite écologique. Le constructeur Nissan propose depuis 2009 un dispositif de retour d'effort sur la pédale d'accélérateur afin d'informer les conducteurs de la position optimale de la pédale pour ne pas avoir une consommation excessive durant la conduite.

Dans d'autres domaines comme l'assistance à la limitation de vitesse, l'utilisation d'une pédale haptique à retour d'effort a déjà été entreprise dans des études de longue durée en Belgique. Pour cette application particulière, l'assistance haptique paraît être meilleure que l'assistance visuelle. Des diminutions significatives de la moyenne et de la variation des vitesses du véhicule, ainsi que des émissions polluantes, ont été observées (*Várhelyi & al, 2004*). L'adaptation à la pédale à retour d'effort est globalement bien notée par les utilisateurs, cependant, ceux-ci n'éprouvent pas le besoin de l'utiliser quotidiennement, ni de payer pour un tel dispositif (*Adell & Várhelyi, 2008*).

Dans une autre application, comme l'assistance au suivi de véhicules, la pédale d'accélérateur à retour d'effort donne une information au conducteur sur la distance inter-véhiculaire. La raideur de la pédale varie proportionnellement à la distance qui sépare le véhicule de l'utilisateur du véhicule de devant. Un tel dispositif permet de réduire significativement l'écart type de la distance inter-véhiculaire, ainsi que le temps de réaction au freinage (*Kuge & al, 2006 ; Mulder & al, 2008*). Il induit également une augmentation des performances de détection visuelle en réduisant le workload conducteur. En particulier car les sujets appliquent une stratégie basique, consistant à maintenir un effort constant à la pédale d'accélérateur lors de la conduite.

8.2.3 Assistance à l'éco-conduite

Généralités

Depuis le début des années soixante-dix, l'union européenne¹⁰ contrôle les taux d'émissions polluantes de ses véhicules, en établissant des standards écologiques de plus en plus drastiques. Dès le début des années quatre-vingt-dix, l'évolution des consciences collectives autour des questions d'écologie, associée à l'augmentation continue des prix à la pompe, pousse les pays à adopter des plans d'amélioration environnementaux pour leur parc véhicules. En plus des règles environnementales

¹⁰ http://europa.eu/legislation_summaries/transport/transport_energy_environment/index_en.htm

fixées aux constructeurs, les pouvoirs publics ont mené des actions pour sensibiliser les citoyens à la pratique de l'éco-conduite : des campagnes publicitaires ont été menées pour donner, sous forme de conseils simples, une méthode pour réduire sa consommation.

En tant que constructeur automobile, Renault se doit de proposer des solutions innovantes pour permettre à ses clients de réduire leur consommation de carburant, tout comme les gaz à effet de serre rejetés. De son côté, le conducteur peut lui aussi apporter une contribution importante à la réduction de la consommation de son véhicule. Pour cela il suffit de suivre quelques recommandations afin d'adopter un style de conduite basé sur une sollicitation modérée du véhicule : l'éco-conduite.

Préconisations sur le comportement de conduite

Les quelques règles d'éco-conduite suivantes ont fleuri un peu partout sur divers supports médiatiques pour inciter les conducteurs à adopter une conduite plus économe en carburant :

- Monter les rapports rapidement :

Monter les rapports avant les 2000 tours/min, car les pertes d'énergie par friction mécanique augmentent avec la vitesse du moteur. Le fait de ne jamais monter dans les tours permet par conséquent de limiter les pertes, donc d'économiser du carburant. Pour cela il faut passer rapidement les rapports et conduire à un régime moteur bas, même à faibles vitesses.

- Conduire à vitesse constante :

Maintenir une vitesse régulière en veillant à enclencher le plus haut rapport possible. L'énergie dissipée à l'accélération pour propulser le véhicule doit être conservée le plus longtemps possible sous forme d'énergie cinétique. Au freinage, cette énergie est perdue par effet joule. Par conséquent, les accélérations et freinages répétés induisent une consommation plus importante de carburant.

- Conduire avec un régime moteur bas :

La phase la plus vorace en carburant est l'accélération du véhicule. Maintenir une vitesse constante ne nécessite pas beaucoup d'énergie. Par conséquent, lors d'un roulage en vitesse de croisière, il est préférable d'engager le plus haut rapport possible pour conduire au régime minimum. Cela permet d'économiser du carburant et n'altère en rien le fonctionnement du moteur si celui-ci est bien entretenu.

- Anticiper le trafic :

Pour éviter les accélérations et les freinages intempestifs, il faut anticiper le trafic pour réguler sa vitesse progressivement. Cela permet d'adopter une conduite avec une vitesse la plus constante possible.

Interfaces d'assistance visuelles

De nos jours, la plupart des véhicules sont équipés d'un afficheur digital de consommation instantanée, au niveau du tableau de bord. Ils affichent la consommation, le plus souvent en "litres/100km". Certains peuvent prendre la forme de jauges qui se remplissent afin d'apporter une représentation schématique de la consommation instantanée (*Figure 40*). Afin d'optimiser la saillance de ce retour d'information sur la consommation, Honda a développé un compteur de vitesse¹¹, doté d'un halo lumineux. Celui-ci change de couleur en fonction du type de conduite. Lorsque le conducteur adopte une conduite écologique, la lumière est verte. Lorsqu'il appuie trop fort et trop souvent sur la pédale d'accélérateur, elle vire au bleu en passant par une couleur intermédiaire bleu-vert (*Figure 40*). Ce système d'assistance à l'éco-conduite a fait son apparition dans la gamme du constructeur, sur le nouveau véhicule hybride Insight en 2009.



Figure 39 : A gauche, indicateur numérique de consommation instantanée, parfois accompagné d'une barre de progression pour visualiser schématiquement la consommation. A droite, indicateur d'éco-performance avec changement de couleur, qui équipe les véhicules hybrides Honda Insight.

Pédale d'accélérateur à retour d'effort

Nissan a commercialisé en 2009 une pédale d'accélérateur à retour d'effort, baptisée *ECO Pedal*¹², qui assiste les conducteurs pour réduire leur consommation (*Figure 51*). Quand le système est actif, chaque fois que le conducteur appuie sur l'accélérateur, un mécanisme de retour d'effort à travers la pédale d'accélérateur, réagit en cas de pression excessive pour signaler au conducteur qu'il consomme peut-être plus de carburant que nécessaire. Un indicateur de conduite économique intégré dans le tableau de bord indique la consommation en temps réel au conducteur, afin de l'aider à améliorer sa conduite. Les recherches réalisées par le constructeur indiquent qu'en utilisant ce dispositif, les conducteurs peuvent améliorer le rendement énergétique de leur moteur de 5 % à 10 %, selon les conditions de conduite.

¹¹ <http://automobiles.honda.com/insight-hybrid/fuel-efficiency.aspx>

¹² http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2008/_STORY/080804-02-e.html

Continental s'est également lancé sur le marché de la pédale haptique en développant un dispositif nommé *AFFP*¹³ (Accelerator Force Feedback Pedal) (*Figure 41*). Cet équipementier a développé une pédale qui peut restituer des vibrations ou des efforts continus. Elle peut apporter des solutions dans des domaines aussi variés que l'assistance au pré-crash, lorsque le conducteur s'approche dangereusement du véhicule devant lui ; ou l'assistance à l'éco-conduite, pour informer les conducteurs du moment opportun auquel passer les rapports, afin d'adopter une conduite écologique.

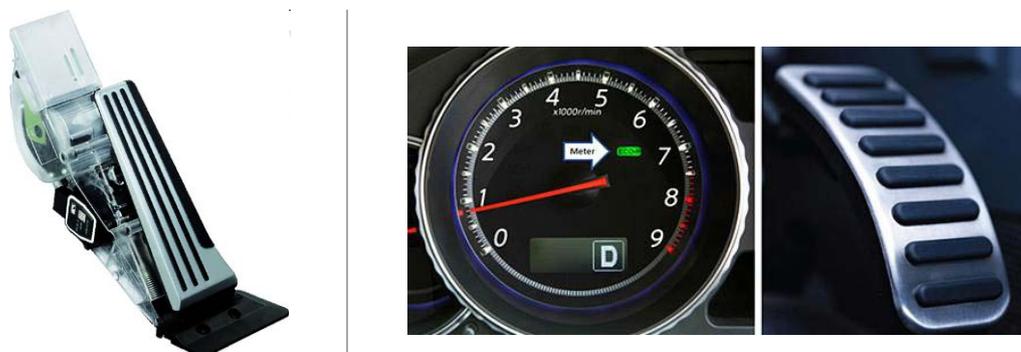


Figure 40 : A gauche, pédale à retour d'effort développée par Continental. A droite, le dispositif *ECO Pedal*[®] de Nissan composé d'une pédale d'accélérateur à retour d'effort et d'un voyant lumineux sur le compte tour pour prévenir les accélérations excessives.

Afin de prévenir les accélérations excessives du véhicule, ainsi qu'une montée trop importante du régime moteur, la pédale renvoie un effort constant au conducteur, qui doit lever le pied jusqu'à atteindre la position optimale de la pédale. Cette assistance s'accompagne d'un indicateur visuel pour aider à l'amélioration de la conduite. Sur la *Figure 42*, on peut voir l'évolution de la vitesse du véhicule et du régime moteur avec (trait plein) ou sans (trait pointillés) activation de l'*ECO Pedal*[®].

¹³ http://www.conti-online.com/generator/www/com/en/continental/pressportal/themes/press_releases/3_automotive_group/chassis_safety/press_releases/pr_2010_02_23_affp_hmi_en.html

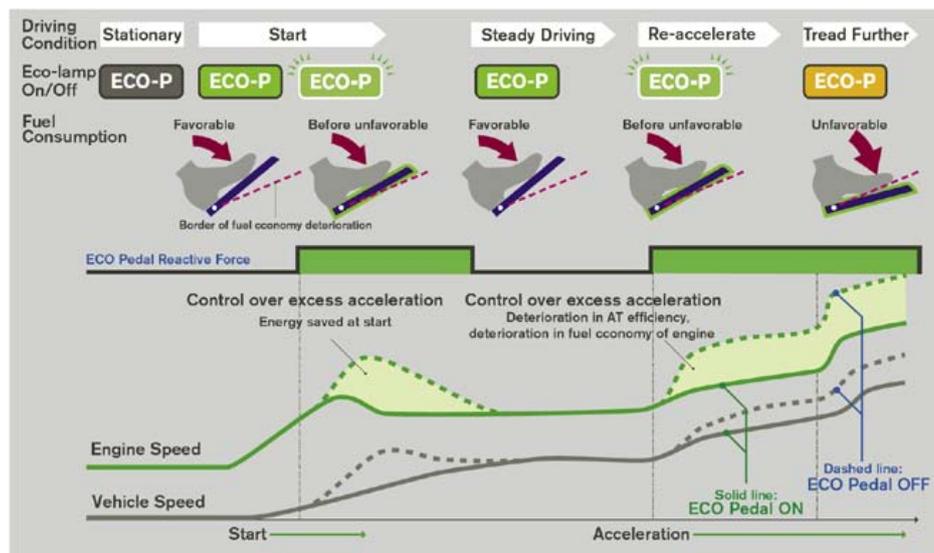


Figure 41 : Sur ce schéma, on peut voir deux courbes décrivant la vitesse du moteur, ainsi que la vitesse du véhicule avec ou sans utilisation de l'ECO Pedal®. En regard de ces courbes, on peut voir les actions réalisées par le pied sur la pédale d'accélérateur, ainsi que le déclenchement de l'effort constant de la pédale.

8.3 Dispositif expérimental

8.3.1 Le simulateur CARDS

Cette expérimentation a été menée sur le simulateur dynamique Cards au CTS Renault. Ce simulateur est composé d'un cockpit modulaire, complètement instrumenté. Il apporte au conducteur tous les équipements et interactions existants dans un véhicule réel. Son fonctionnement est basé sur l'application SCANer2®, développée par Renault et commercialisée par la société Oktal. Cette application distribuée en temps réel, dispose d'un large éventail de fonctionnalités, facilitant ainsi le domaine de la recherche sur les comportements de conduite.

L'affichage de la route est rendu par 3 projecteurs délivrant une image dont le champ de vision horizontal atteint 150°. La validité visuelle absolue du simulateur CARDS est renforcée par ce champ de vision suffisamment large. Cette précaution permet une estimation correcte de la vitesse longitudinale du véhicule à l'aide des indices de vision périphérique (Kemeny & Panerai, 2003).

Pour les besoins de l'expérience, le simulateur a été enrichi de deux dispositifs d'assistance à l'éco-conduite : une interface visuelle (Figure 43), positionnée devant la console centrale, juste au dessus du levier de vitesse, et un dispositif de retour d'effort sur la pédale d'accélérateur du simulateur.

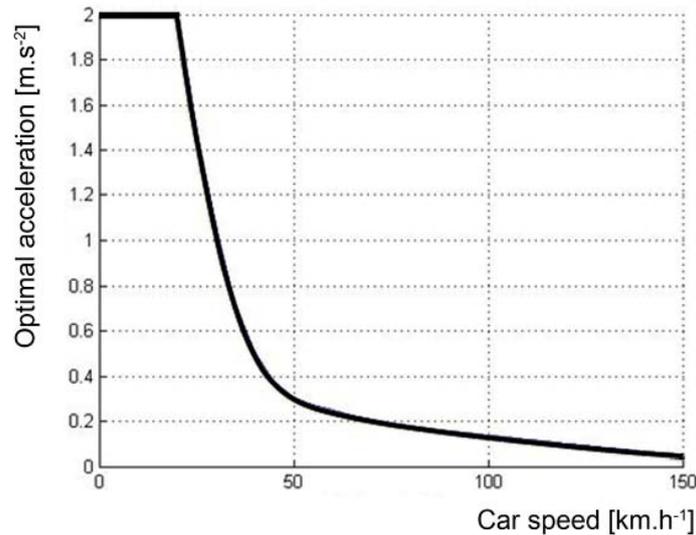


Figure 42 : A gauche, vue du cockpit du simulateur Cards. Sur la console centrale, on peut voir l'écran d'assistance visuelle à l'éco-conduite. A droite, vue de dessus de l'environnement routier de la simulation, avec en rouge le trajet à suivre par les sujets. Le trajet prend tour la tour la forme de routes droites suffisamment longues pour une accélération complète jusqu'à 50km/h, mais également des ronds-points, ainsi que des virages incurvés ou à angle droit.

8.3.2 Loi d'éco-conduite

Pendant la conduite, un modèle compare en temps réel, sur la base d'une loi d'éco-conduite dont Renault est propriétaire (*Figure 44*), l'accélération longitudinale du véhicule Acc_{veh} avec un niveau d'accélération optimale Acc_{opt} , qui dépend de la vitesse du véhicule. Ainsi, si la vitesse est basse, les accélérations élevées sont davantage tolérées que pour les vitesses élevées. Ce modèle ne prend pas directement en compte le régime moteur, même si celui-ci intervient indirectement à travers le paramètre Acc_{veh} .

D'une manière générale, lorsque les accélérations du véhicule sont supérieures au niveau optimal, un couple $F_{additionel}$, proportionnel à la sur-accélération préalablement normalisée par Acc_{opt} , est opposé au pied du conducteur. Le détail du calcul du couple pédale est consultable (*Figure 44*). La force exercée sur le pied du conducteur atteint une amplitude de 35N lorsque : Acc_{veh} est deux fois supérieur à Acc_{opt} . Ce retour d'effort en forme de force de raideur permet de détecter plus tôt l'apparition d'une force transmise par la pédale, mais aussi les variations de force qui s'opèrent (*Mulder & al, 2010*).



Acc_{veh} = Accélération du véhicule Acc_{opt} = Accélération optimale ΔAcc = Sur-accélération basée sur notre modèle X_{pedal} = Position de la pédale $\Delta Acc = Acc_{veh} - Acc_{opt}$ $F_{additional} = K \cdot X_{pedal} \cdot (\Delta Acc / Acc_{opt})$ Avec K = Coefficient de raideur
--

Figure 43 : Graphique résumant le principe du modèle d'éco-conduite de Renault (à gauche) ; et calcul du couple $F_{additional}$, qui sera appliqué au conducteur par l'intermédiaire de la pédale d'accélérateur (à droite).

8.3.3 La pédale d'accélérateur à retour d'effort

Pour les besoins de l'étude, le simulateur Cards a été enrichi de deux dispositifs d'assistance à l'éco-conduite : une interface visuelle, sur la console centrale dans le cockpit, représentant une barre de progression, délivre une représentation visuelle de la valeur de $F_{additional}$; et une pédale d'accélérateur couplée à un actionneur, stimulant haptiquement le pied du conducteur en superposant une force supplémentaire $F_{additional}$ à la force initialement exercée par la pédale. Ces deux dispositifs délivrent exactement la même information aux conducteurs, mais à travers deux canaux sensoriels différents.

La pédale est reliée, par l'intermédiaire d'une biellette, à un moteur piloté en CAN par le logiciel Labview ; solution utilisée pour gérer les acquisitions et les émissions d'informations dans le cockpit du simulateur. Nous avons développé un modèle Matlab/Simulink, avec la course de la pédale d'accélérateur comme seul paramètre d'entrée. L'équation de $F_{additional}$ utilise ce paramètre, ainsi qu'une cartographie des accélérations optimales pour calculer le couple qui sera appliqué au moteur. Cette information est ensuite convertie en trames CAN pour être transmise au moteur.

8.4 Protocole

8.4.1 Tâche expérimentale

Comme on peut le voir sur les *Figure 43* et *Figure 45*, la tâche expérimentale consiste à conduire dans un environnement urbain, le long d'un trajet prédéfini. Le parcours ne comporte pas de trafic, afin de s'assurer que les sujets réalisent bien la tâche dans les mêmes conditions. Cette précaution permet de comparer plus efficacement et plus précisément les performances d'éco-conduite entre les conditions expérimentales. Bien sûr, ce choix met à mal le caractère écologique des conditions expérimentales. Cependant, sur une conduite aussi courte (les essais longs pouvant être fatigants pour les sujets sur simulateur), la présence d'un trafic routier introduirait un biais non négligeable sur les bilans d'émissions polluantes. Nous avons donc cherché un compromis entre un protocole écologiquement valide, et un protocole répétable par tous les sujets.



Figure 44 : A gauche, aperçu d'un rond point emprunté par les conducteurs participants à l'étude. A droite, on peut voir que l'environnement virtuel propose un ville riche en détails avec des grandes artères où il est possible d'accélérer et des rues plus étroites.

8.4.2 Participants

28 sujets, âgés de 25 à 45 ans, ont pris part à cette expérimentation (7 féminins, et 21 masculins). Tous les conducteurs étaient en possession d'un permis de conduire en cours de validité.

Les participants étaient séparés en 4 groupes distincts de 7 sujets chacun. Trois groupes ont bénéficié d'un retour d'assistance à l'éco-conduite lors du troisième essai. Le groupe visuel (S_v) disposait d'un écran d'assistance ; le groupe haptique (S_h), était assisté par la pédale à retour d'effort ; et le groupe visuo-haptique (S_{vh}), avait les deux types d'assistance, visuelle et haptique. Le quatrième groupe est le groupe de référence (S_n), ses conducteurs ne disposaient d'aucune assistance.

8.4.3 Conditions

Dans un premier temps, les participants suivent une session d'entraînement sur le simulateur, pendant laquelle on demande aux conducteurs de réaliser deux essais de découverte du simulateur et de la tâche expérimentale. Pour les sujets appartenant aux groupes qui bénéficient d'une aide à l'éco-conduite, la session d'entraînement porte également sur le fonctionnement des interfaces utilisées : visuelle ou haptique, voire les deux. Après cette session d'essai, tous les participants ont déclaré se sentir à l'aise avec l'ensemble du dispositif expérimental.

Les sujets ont conduit le même itinéraire, quatre fois, dans différentes conditions :

- $T1_{ref}$: conduite normale sans la moindre instruction, ni assistance.
- $T2_{eco-behavior}$: conduite avec la consigne de ne pas dépasser 2000 tours/min.
- $T3_{eco-assistance}$: identique à la condition 2 avec le support d'une assistance.
- $T4_{eco-behavior}$: répétition de la condition 2.

8.4.4 Données calculées

Les paramètres suivants sont calculés chaque essai, ils représentent des indicateurs objectifs de la performance d'éco-conduite dans chaque condition :

- La quantité totale d'émissions polluantes, calculée sur la base d'un modèle de consommation de carburant diesel pour un véhicule Renault Mégane.
- $Std(X_{pedal})$, l'écart type de la position de la pédale d'accélérateur, calculé sur l'ensemble de la trajectoire, à chaque essai.
- $Mean(\Delta Acc)$, la moyenne de sur-accélération, résultant de la différence entre Acc_{veh} , l'accélération longitudinale instantanée du véhicule, et Acc_{opt} , l'accélération optimale, donnée par la loi d'éco-conduite.

A l'aide du logiciel Statistica[®], nous avons réalisé des tests de Shapiro sur les données relatives à ces trois paramètres.

Pour l'ensemble des 28 essais témoins ($T1_{ref}$), nous constatons que l'échantillon $Std(X_{pedal})$ suit la distribution gaussienne, tandis que les deux autres paramètres ne suivent pas une loi normale. Si l'on se place maintenant dans les 56 essais avec consignes verbales d'éco-conduite ($T2_{eco-behavior}$ & $T4_{eco-behavior}$), on s'aperçoit que l'ensemble de nos paramètres suivent une loi normale (**Figure 46**). Cette consigne verbale a donc l'avantage d'harmoniser nos données pour mieux appliquer une ANOVA par la suite entre les conditions avec consignes verbales ($T2_{eco-behavior}$ & $T4_{eco-behavior}$) d'une part et la condition avec consigne verbale et assistance à l'éco-conduite ($T3_{eco-assistance}$) d'autre part.

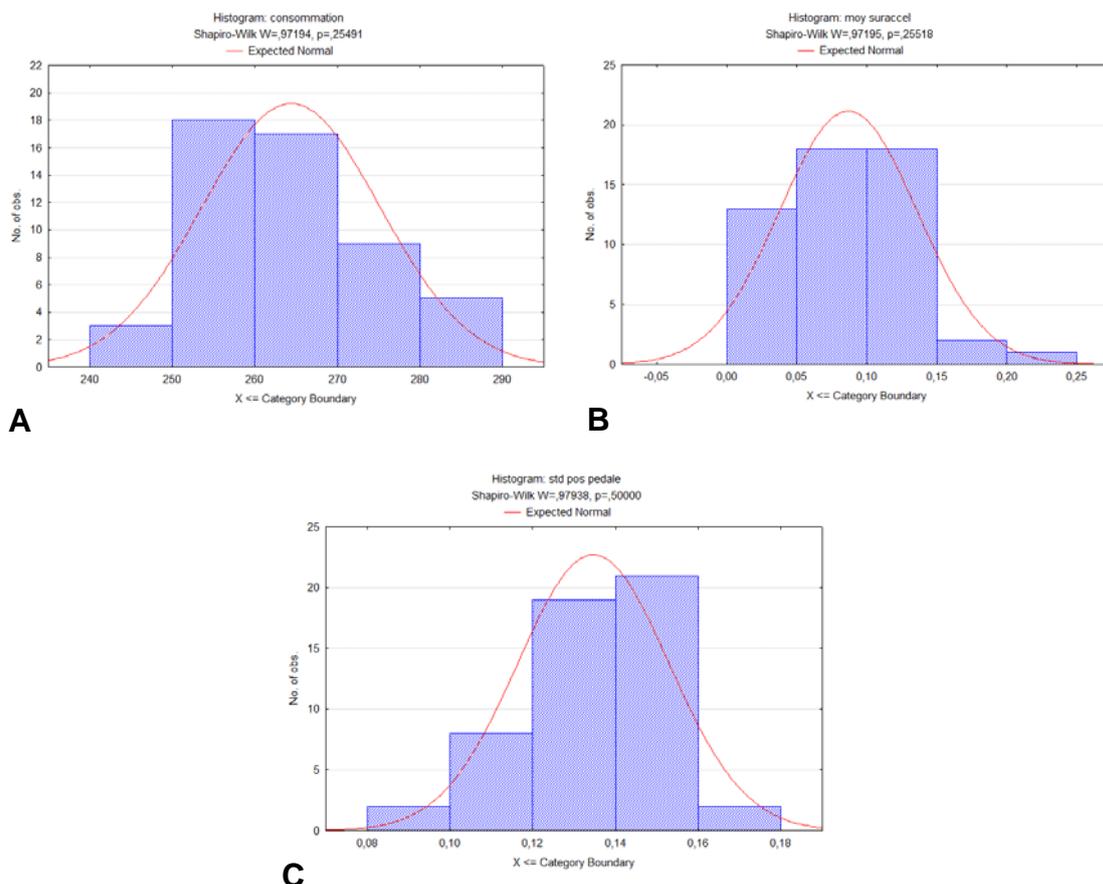


Figure 45 : Distribution de nos trois paramètres d'intérêt, en tenant compte des 56 essais avec consignes verbales d'éco-conduite ($T2_{eco-behavior}$ & $T4_{eco-behavior}$), on constate que l'ensemble de nos échantillons suivent une loi normale. **A** : Quantité totale d'émissions polluantes. **B** : Mean(ΔAcc). **C** : Std(X_{pedal})

8.5 Résultats

Avec le logiciel Statistica[®], nous avons effectué des comparaisons planifiées ANOVA (ANALYSIS OF VARIANCE) avec un coefficient $\alpha = 0,05$ sur nos paramètres d'intérêt (**Table 1**).

Une comparaison entre $T1_{ref}$ et $T2_{eco-behavior}$ a été réalisée sur l'ensemble des sujets, quelque soit le groupe auquel ils appartiennent. Une diminution significative de nos paramètres d'intérêt a été observée.

Une comparaison inter-groupes, portant uniquement sur l'essai assisté $T3_{eco-assistance}$ a été réalisée pour évaluer l'apport de chaque type d'assistance, par rapport au groupe de référence sans assistance (S_n). Nous réalisons que la présence d'un système d'assistance à l'éco-conduite induit une diminution significative de nos paramètres d'intérêt. Cependant, nous n'avons pas observé d'effet significatif lié au type d'assistance utilisé.

En comparant, pour chaque groupe assisté, les essais avec consigne verbale¹⁴ (moyenne de $T2_{eco-behavior}$ et $T4_{eco-behavior}$) aux essais assistés $T3_{eco-assistance}$, nous constatons que l'assistance visuelle ne conduit à des améliorations significatives pour aucun des paramètres observés. Dans le groupe assisté haptiquement, les émissions polluantes totales constituent le seul paramètres qui n'est pas significativement amélioré. Dans le groupe visuo-haptique, tous les paramètres observés sont significativement réduits.

	Total polluting emissions	Std (X_{pedal})	Mean (ΔAcc)
All subjects ($T1_{ref}$ vs $T2_{eco-behavior}$)	F(1.88)= 19,87; p<0.001	F(1.88)= 25,85; p<0.001	F(1.88)= 23,15; p<0.001
S_v group ($T2 + T4$ vs $T3$)	NS	NS	NS
S_h group ($T2 + T4$ vs $T3$)	NS	F(1.88)= 12,84; p<0.001	F(1.88)= 6,62; p<0.05
S_{vh} group ($T2 + T4$ vs $T3$)	F(1.88)= 4,32; p<0.05	F(1.88)= 14,23; p<0.001	F(1.88)= 9,38; p<0.005
$T3_{eco-assistance}$ trials (S_n vs S_v)	F(1.88)= 4,69; p<0.05	F(1.88)= 5,45; p<0.05	F(1.88)= 4,42; p<0.05
$T3_{eco-assistance}$ trials (S_n vs S_h)	F(1.88)= 5,74; p<0.05	F(1.88)= 5,68; p<0.05	F(1.88)= 6,35; p<0.05
$T3_{eco-assistance}$ trials (S_n vs S_{vh})	F(1.88)= 7,51; p<0.01	F(1.88)= 7,55; p<0.01	F(1.88)= 7,86; p<0.005

Table 1 : Résultats des différentes comparaisons planifiées ANOVA, portant sur nos paramètres d'intérêt.

8.6 Discussion

Cette étude constitue une première étape pour démontrer l'efficacité de la pédale d'accélérateur à retour haptique sur la performance d'éco-conduite, ainsi que la capacité des conducteurs à s'adapter à un tel dispositif de retour d'information lors de la première utilisation.

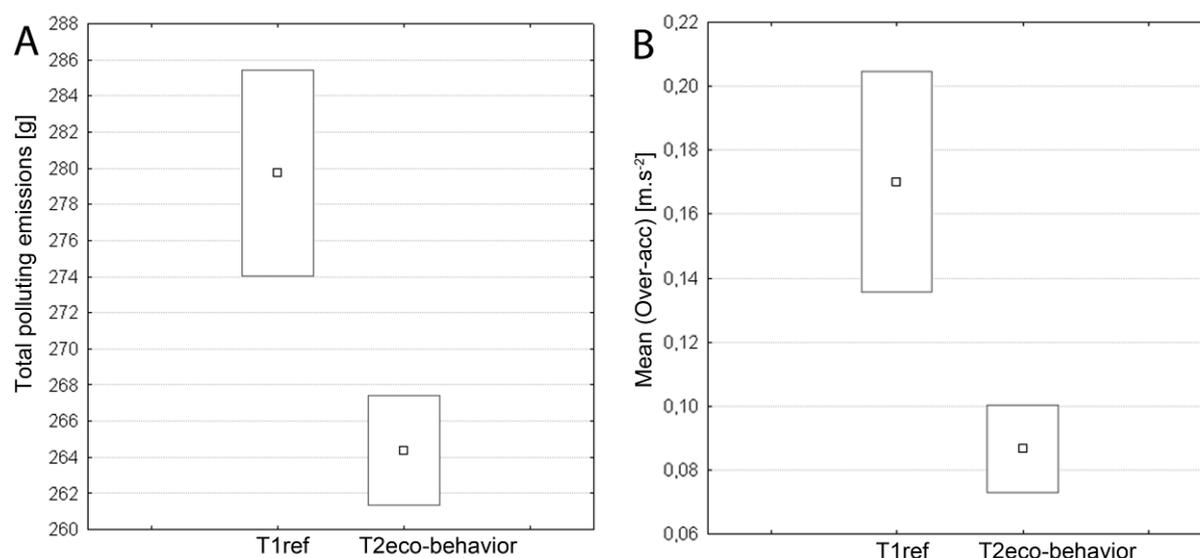
Nous avons choisi d'immerger les conducteurs dans un environnement simulé, sans présence de trafic routier, afin de mieux maîtriser la répétitivité de la tâche, et permettre une meilleure comparaison entre les performances réalisées dans les différentes conditions expérimentales. Ce choix peut donner un traitement préférentiel à la condition assistée visuellement. En effet, dans des conditions expérimentales écologiques, en présence de trafic sur le parcours, l'attention visuelle allouée à la route serait plus importante, ce qui détournerait l'attention visuelle des conducteurs du dispositif visuel d'assistance à l'éco-conduite.

¹⁴ La moyenne de $T2$ et $T4$ sert à annuler le biais du aux effets d'apprentissage portant sur la conduite à bas régime au cours des 3 derniers essais de chaque sujet

8.6.1 Apport des consignes à l'éco-performance

Dans cette expérimentation, le fait d'adopter un comportement d'éco-conduite, en limitant le régime moteur à 2000 tours/min, constitue un premier pas significatif vers la réduction de la quantité d'émissions polluantes de 5%, en comparaison aux essais réalisés sans instructions verbales (*Figure 47. A*).

Le dépassement moyen des accélérations optimales diminue significativement (*Figure 47. B*), suggérant l'existence d'une corrélation entre notre loi d'accélération optimale et les comportements, voire les conseils d'éco-conduite.



Statistiques sur l'ensemble des sujets

Figure 47 : Niveaux d'émissions polluantes totales (A) ; et des sur-accélérations moyennes (B), pour les essais T1 et T2, calculés sur l'ensemble des sujets.

8.6.2 Apport supplémentaire des systèmes d'aide à l'éco-conduite

En plus des réductions observées avec de simples conseils d'éco-conduite, dans les trois conditions assistées, on constate une diminution significative de 5 à 7% des émissions polluantes sur l'ensemble du parcours (*Figure 48. A*). Ce résultat est cohérent avec la performance annoncée pour la pédale *AFFP* de Continental, ou l'*ECO Pedal* de Nissan. Cependant, il ne semble pas exister d'effet significatif du au type d'assistance utilisé. Cela suggère que la stimulation haptique peut être aussi efficace qu'une stimulation visuelle, en termes de performance d'assistance à l'éco-conduite. Dans les deux cas, en présence d'une assistance conducteur, le niveau de sur-accélérations décroît significativement (*Figure 48. B*). Ce résultat nous laisse penser que notre loi d'éco-conduite est efficace, autrement dit qu'une optimisation des sur-accélérations permet une réduction supplémentaire des émissions polluantes, par

rapport à une optimisation du régime moteur seule. En effet, l'assistance et les consignes verbales agissent sur deux phases distinctes de l'accélération : passer les rapports sous les 2000 tours/min permet de limiter les sursrégimes, particulièrement gourmands en carburant ; tandis que nos dispositifs d'assistance à l'éco-conduite permettent d'optimiser la phase d'accélération qui précède les passages de rapports. Ainsi il est contre-indiqué d'accélérer trop fort, en voulant vaincre trop rapidement l'inertie du véhicule, car ce comportement est également très dépen- sier en carburant.

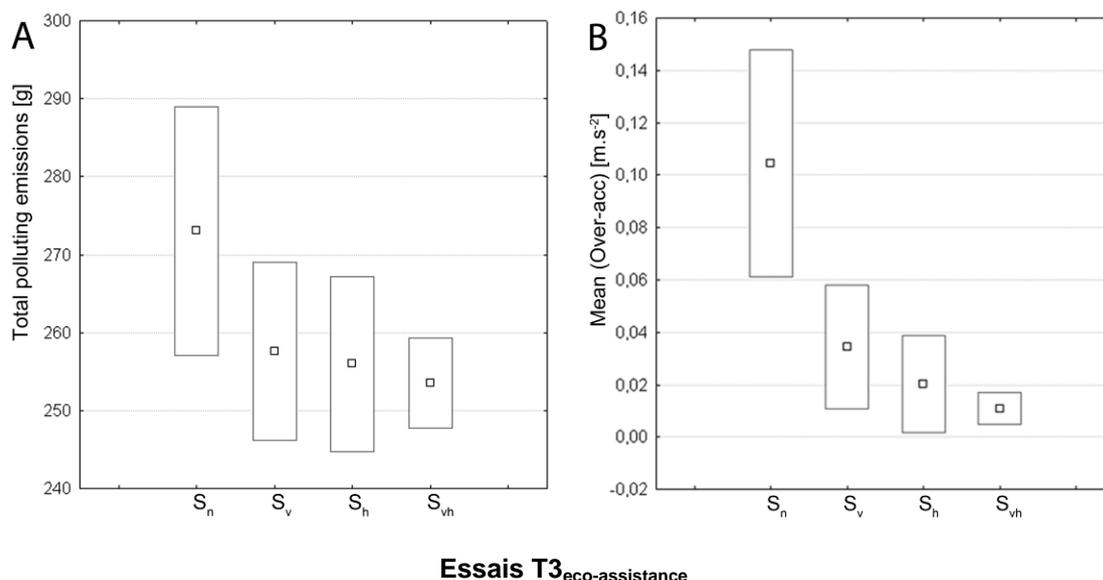


Figure 46 : Niveaux des émissions polluantes (A), et de la moyenne des sur-accélérations (B), pour chaque groupe, lors de l'essai T3

8.6.3 Apports de la pédale haptique

Méthode d'évaluation du workload conducteur

Afin de respecter l'aspect écologique de l'expérimentation, nous avons choisi de ne pas utiliser une tâche secondaire, comme une PDT (*Patten & al, 2004, 2006*), pour mesurer le workload du conducteur. Nous préférons le mesurer sur les données objectives recueillies pendant la simulation. Pour cela, nous mesurons l'écart type de la position de la pédale, car dans le cas présent, c'est cette position imposée par le conducteur, qui traduit le plus la sollicitation du workload par le dispositif d'éco-conduite que nous voulons étudier. Cette méthode, déjà utilisée par (*Mulder & al, 2008*), a l'avantage de favoriser les conditions écologiques de la conduite, car les sujets ne sont pas soumis à une tâche secondaire et peuvent recentrer leur concentration sur la tâche de conduite et l'interaction avec dispositif dont on veut mesurer les effets : en l'occurrence, la pédale d'éco-conduite à retour d'effort. Dans notre étude, c'est la mesure du workload qui traduit la préférence des conducteurs sur le type d'assistance : visuelle ou haptique. Ainsi, si le workload avec l'assistance haptique se rapproche du workload visuo-haptique, on pourra penser que la modalité haptique se rapproche de l'optimalité visuo-haptique. Elle sera donc plus efficace que la modalité visuelle pour cette tâche d'éco-conduite en particulier.

Réaction des conducteurs à la première utilisation de la pédale haptique

L'objectif du dispositif est d'inciter le conducteur à diminuer la variabilité de la position de la pédale d'accélérateur, ce qui se traduit par une limitation des accélérations intempestives afin d'adopter une conduite plus souple, donc plus écologique et économe en carburant. Partant de là, nous supposons que si l'écart-type de la position de la pédale diminue, cela signifie que le conducteur comprend le fonctionnement de l'assistance et corrige son comportement. Dans le cas contraire, cela signifierait que les actions du conducteurs ne sont pas en phase avec la stratégie de retour d'effort de la pédale, ce qui conduirait à une augmentation du workload du à une pression supplémentaire induite par le système.

S'il fallait établir un parallèle, nous dirions que le système agit un peu sur le principe d'une assistance au volant. Le couple volant étant corrélé à l'accélération latérale du véhicule, il donne un renseignement sur les limites d'adhérence du véhicule. De façon analogue, en fournissant une information haptique au conducteur par le biais de la pédale d'accélérateur, ce dernier peut ramener son pied à la position optimale.

Bien que les dispositifs haptiques soient plus récents que les affichages visuels dans le domaine des systèmes d'aides à la conduite, les conducteurs font montre d'une bonne adaptation aux variations du signal haptique. Dans les groupes assistés haptiquement (condition haptique et visuo-haptique), nous notons une diminution significative de l'écart-type de la position de la pédale d'accélérateur, lorsque nous comparons cet indicateur entre les essais avec consignes verbales de conduite à bas régime, et les essais assistés. Dans le groupe visuel, par contre, cette diminution n'est pas significative (*Figure 49. A*). D'après ces deux observations, on pourrait penser que la stabilité de la pédale est accrue lorsqu'une réaction est opposée au pied, aidant ainsi à le guider vers la position recommandée par le système. Cela montre une meilleure efficacité de la pédale à retour d'effort sur la stabilité du pied, lors d'une première utilisation du dispositif. Cette dernière est perçue "confortable" par les utilisateurs. Les conducteurs n'ont qu'à pousser la pédale, jusqu'à ressentir un couple supplémentaire, puis s'appuyer sur cette réaction pour stabiliser l'effort renvoyé par la pédale. Cela leur permet de rester proches d'une condition optimale d'éco-conduite, sans sur-accélérations ni sous-accélérations.

La modalité haptique possède des avantages physiologiques qui pourraient expliquer ces résultats. Nous savons qu'un conducteur est capable de réaliser des modifications très rapides de l'impédance du pied, en s'adaptant à la spécificité de la tâche à accomplir. Ainsi, il adoptera pour une stratégie différente suivant qu'il soit soumis à une tâche de contrôle en effort ou en position de la pédale. En mesurant l'activité musculaire de la jambe sur une pédale d'automobile, durant des tâches de force (minimiser les variations d'efforts, sans tenir compte de la position), et des tâches de position (résister aux perturbations d'efforts), il apparaît que les conducteurs utilisent les muscles antagonistes de la jambe afin de s'adapter aux divers modes d'utilisation imposés par une pédale active (*Abbink & al, 2004*). Cette propriété est également vraie pour les bras des conducteurs, la co-contraction des muscles antagonistes est utilisée pour manipuler le volant pendant la conduite (*Pick & Cole,*

2006, 2007). Cette stratégie permet aux conducteurs de contrôler la trajectoire de leur véhicule avec différentes lois de retour d'effort au volant, qu'elles soient linéaires ou pas (Toffin & al, 2003). Cela implique une forte plasticité sensorimotrice et une grande capacité d'adaptation aux perturbations des stimuli haptiques.

Notre expérimentation faisant appel à une tâche d'effort, la stimulation produite par la pédale haptique est inhibitoire (Mugge & al, 2010). En effet, il est demandé aux participants d'annuler le retour d'effort supplémentaire lorsque celui-ci apparaît, en relâchant la pédale d'accélérateur. Malgré leurs différences neuronales et anatomiques, les membres supérieurs et inférieurs semblent être capables de réaliser la même performance perceptive, en termes de discrimination d'effort. Cette aptitude permet une détection rapide des variations du retour d'effort par le pied du conducteur à travers la pédale. En outre, cela induit une réponse rapide à la stimulation haptique par un relâchement de la pédale. Cette propriété de la perception haptique pourrait expliquer les bons résultats obtenus sur la minimisation des sur-accélérations, en présence de la pédale d'assistance à retour haptique dans notre expérimentation.

Une autre tentative d'explication, pourrait résider dans le rôle du réflex moteur lors d'une stimulation tactile ou haptique. En effet, le visuel est une modalité passive, dans la mesure où il faut percevoir la stimulation visuelle, interpréter l'information perçue, puis décider de la réaction à adopter pour réagir à la stimulation avant d'envoyer une commande motrice pour effectuer les mouvements nécessaires. Dans le cas d'une stimulation haptique, le processus de perception-interprétation-action pourrait avoir lieu en parallèle d'un retour reflex engendré par le raidissement de la pédale d'accélérateur. Ainsi, en raccourcissant la boucle perception-action, il est probable que le temps de réaction avec la pédale haptique s'en trouve raccourci.

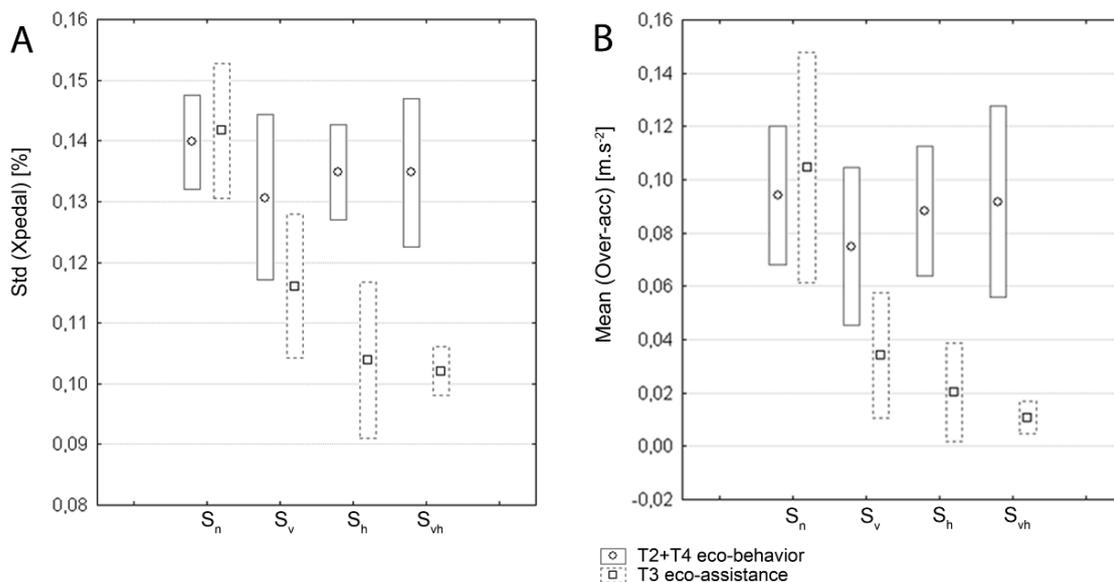


Figure 47 : Représentation des essais avec instructions verbales d'éco-conduite, et des essais assistés, pour l'écart-type de la position de la pédale d'accélérateur (A), et pour les moyennes de sur-accélération des conducteurs (B).

8.6.4 Intégration visuo-haptique

Lorsque les conducteurs ont à leur disposition les deux interfaces d'assistance à l'éco-conduite : visuelle et haptique ; on constate que la diminution des sur-accélération est significative, par rapport à la condition nominale. Cette réduction est également significative pour l'assistance haptique seule, mais pas dans la condition avec assistance visuelle seule (*Figure 49. B*). Les conducteurs montrent un taux plus important d'auto-amélioration de leurs éco-performances quand l'assistance haptique est disponible, par opposition à l'assistance visuelle seule. Cela suggère que la modalité haptique est plus adaptée pour la double tâche de notre expérimentation en particulier (conduire et réagir avec l'assistance d'éco-conduite). Ce résultat est cohérent avec l'idée de "confiance", accordée à la fiabilité de la modalité haptique, lorsque la modalité visuelle est dégradée. C'est d'ailleurs le cas dans une tâche visuo-haptique de détection de taille (*Ernst & al, 2002 ; Gepshtein & al, 2003*), où la pondération des modalités dans l'émergence d'une perception finale, tient compte de l'efficacité de chaque modalité dans le contexte de la tâche.

À cela, (*Helbig & Ernst, 2008*) ajoutent qu'un canal sensoriel saturé, dont l'attention serait réduite, comme c'est le cas du visuel dans notre tâche de conduite, voit une réduction de la confiance accordée à son efficacité, ce qui a pour conséquence de faire baisser son poids dans l'intégration visuo-haptique opérée. Dans notre étude, cette dégradation de la confiance, accordée par le conducteur à la fiabilité de la modalité visuelle comme canal d'assistance à l'éco-conduite, pourrait être une conséquence de la compétition du workload visuel induit par la tâche de conduite. Si l'on suit ce raisonnement, on pourrait penser que la performance de perception visuelle se dégraderait encore plus avec l'augmentation de la complexité du trafic routier, ce qui a déjà été observé par (*Nunes & al, 2005*), qui constatent une détérioration des performances de détection et de discrimination visuelles. Par analogie, nous pourrions penser qu'un nombre croissant de virages sur le circuit à parcourir aurait diminué d'autant les capacités de perception visuelle des conducteurs.

Les performances très proches en termes d'éco-performance pour les deux modalités d'assistance, ainsi que la grande plasticité du système sensorimoteur dans les mouvements du pied, nous poussent à croire que ces deux modalités sont interchangeables pour des applications d'éco-conduite. Il suffit pour cela d'adapter un dispositif haptique aux exigences de la conduite, i-e le moins intrusif possible.

8.7 Conclusion et perspectives

Dans un premier temps, cette étude confirme l'efficacité des comportements basiques d'éco-conduite sur les niveaux d'émissions polluantes ; comme l'incrémentement des rapports avant d'atteindre un régime moteur de 2000 tours/min. Ajouter une assistance à l'éco-conduite (visuelle ou haptique) permet une réduction substantielle supplémentaire des émissions polluantes. Cependant, aucun effet sur le type d'assistance n'a été constaté dans nos essais. Avec une assistance haptique ou visuo-haptique, on observe également une diminution significative du workload conducteur, mesuré par l'écart-type de la position de la pédale d'accélérateur. Cela

accrédite par ailleurs la thèse selon laquelle la pédale d'accélérateur à retour d'effort serait plutôt facile d'adaptation lors de la première utilisation du système. Pour finir, les conducteurs semblent davantage se reposer sur la modalité haptique lorsqu'ils utilisent en même temps assistance visuelle et haptique.

Les constructeurs comme Renault ont tout intérêt à commencer à explorer d'autres canaux d'information et d'assistance du conducteur. En effet, la modalité visuelle est déjà sollicitée pour suivre la route ; à cela s'ajoute la multiplication des interfaces visuelles dans le cockpit du véhicule, qui contribue à saturer l'attention visuelle du conducteur. Nous nous apercevons que pour des applications d'éco-conduite, les interfaces haptiques sont capables de remplir leur rôle aussi bien que les interfaces visuelles. En outre, elles ont des avantages indéniables : continuité du retour d'information et rapidité de la réaction, puisque la perception et la réaction au système se font par l'intermédiaire d'un seul et même organe du véhicule : la pédale d'accélérateur.

Dans cette expérimentation, l'assistance visuelle pourrait avoir été avantagée en raison de l'absence de trafic. Les études à venir pourraient aborder l'impact de la complexité du trafic routier sur l'efficacité d'assistance de la modalité visuelle et haptique. Un autre sujet d'intérêt concerne l'adaptation à la pédale d'accélérateur à retour d'effort sur le long terme, mais également le comportement des conducteurs dans des situations critiques d'usage, par exemple lorsque les conducteurs ont besoin d'accélérer dans une situation accidentogène malgré un effort grandissant transmis par la pédale.

9 Couplage visuo-haptique au volant

9.1 Objectifs

Nous cherchons ici à analyser les réactions des conducteurs lors de l'application soudaine d'un gain de démultiplication au volant, accompagné ou non, de l'application du même gain au retour d'effort du volant. Nous voulons savoir s'il est judicieux d'appliquer le même gain à la démultiplication de la direction et au couple au volant, afin de préconiser des règles visant à optimiser le ressenti conducteur lors d'une conduite avec une démultiplication variable.

Nous voulons également analyser la réaction adaptative des conducteurs à l'application de tels gains. Pour cela, il nous faudra trouver des indicateurs de conduite pertinents pour comprendre les stratégies employées. Nous pensons que le fait d'introduire un gain sur le retour visuel ou haptique, pourrait introduire un biais sur la modalité concernée, dans la mesure où ce gain viendrait perturber une représentation mentale, communément appelée modèle interne de la dynamique du véhicule.

D'un autre côté, il est fort possible que la plasticité du système sensorimoteur, responsable de l'adaptation des conducteurs, puisse nous réserver bien des surprises. La gêne occasionnée par l'introduction d'un gain pourrait ne pas être mesurable sur des critères tels que : l'écart latéral dans la voie, l'angle au volant, le couple conducteur, ou encore la vitesse du volant...

9.2 Bibliographie

9.2.1 Direction à démultiplication variable

Sur les véhicules classiques, le ratio de démultiplication entre la rotation du volant et celle des roues est de 1/16. i-e qu'il faut tourner le volant de 16° pour obtenir une rotation des roues de 1°. L'application d'un gain double à la démultiplication du véhicule entraîne une baisse du ratio de rotation roues/volant à 1/8. Dans ce cas, le volant devient plus sensible, puisque le conducteur doit appliquer un angle au volant deux fois plus petit qu'en conditions nominale, pour une rotation des roues identique.

Certains modèles de véhicules intégrant une direction à démultiplication variable commencent à faire leur apparition sur le marché. Cette fonctionnalité laisse le soin à un calculateur de modifier le ratio roues/volant en fonction de la vitesse du véhicule. Ainsi, les conducteurs auront moins besoin de tourner le volant pour prendre un virage à basse vitesse, ou réaliser une manœuvre de stationnement. A haute vitesse, la démultiplication de la direction retrouve le ratio de 1/16, équipant les véhicules classiques à démultiplication fixe.

Bien sûr, les véhicules SBW (Steer By Wire) n'étant pas autorisés à la commercialisation, les constructeurs ont développé des systèmes de VSR (Variable Steering Ratio), tout en conservant une liaison mécanique entre le volant et les roues

du véhicule. Cette évolution permet d'appliquer une "démultiplication variable" à la direction, en fonction de la vitesse du véhicule.

Sur le marché automobile, certains constructeurs ont déjà commercialisé des systèmes de VSR. Le premier d'entre eux, BMW a baptisé son système AFS¹⁵ (Active Front Steering). L'une des fonctionnalités de l'AFS consiste à superposer à l'angle des roues, imposé par le volant, un angle supplémentaire généré par deux moteurs au niveau de la crémaillère. Toyota a appelé son système VGRS¹⁶ (Variable Gain-Ratio Steering). Chez Audi, cette fonction porte le nom : Dynamic Steering¹⁷

L'AFS est plus apprécié par les conducteurs qu'une direction classique à démultiplication fixe. À basse vitesse, ils jugent l'AFS meilleur en termes de facilité de prise de virage, ce qui améliore leur confort de conduite perçu. En mode dégradé, l'AFS semble également être mieux apprécié, dans la mesure où les ruptures de couple volant sont plus faciles à contrôler par les conducteurs (*Jamson & al, 2007*). De plus, coupler un système AFS avec une assistance ESP ouvre des possibilités supplémentaires d'amélioration de la stabilité du véhicule. En plus de la gestion du freinage individualisé des roues, il devient alors possible d'utiliser l'angle de rotation additionné par l'AFS, pour remettre le véhicule dans une trajectoire stable. Cette utilité a en particulier été démontrée pour des manœuvres de changement de file et de freinage μ -split¹⁸ (*Noh & al, 2007*).

9.2.2 Adaptation sensorimotrice

Les conducteurs semblent contrôler leur véhicule en boucle ouverte grâce à un modèle inverse de la conduite, qui permet d'estimer les angles à appliquer au volant pour obtenir la dynamique du véhicule voulue (*Cunningham & al, 2001*). En parallèle, un contrôle en boucle fermée des erreurs de comportement du véhicule, permet de réagir pour corriger les erreurs de consigne du modèle inverse (*Wallis & al, 2007*). Afin d'anticiper ces erreurs de prédiction, et donc les minimiser, les conducteurs s'appuient sur un modèle interne de la dynamique du véhicule pour estimer les angles à appliquer au volant. Lorsqu'une modification du "mapping" sensorimoteur de la conduite survient, la réaction d'urgence du système nerveux central consiste à employer une stratégie de modulation d'impédance, dans laquelle la raideur des bras est amplifiée afin d'augmenter leur robustesse aux perturbations, au détriment de la précision de manipulation du volant. Puis, au fur et à mesure de la mise à jour de notre modèle interne, celui-ci reprend progressivement le dessus sur la stratégie de modulation d'impédance (*Gribble & al, 2003*).

Une étude, portant sur l'influence d'un changement de loi de commande de l'assistance au volant sur le comportement du conducteur, a été menée par (*Toffin & al, 2003*) sur le simulateur Cards, au CTS (le même simulateur ayant servi à notre étude). Lorsque les conducteurs sont soumis (à leur insu) à une modification des

¹⁵ http://www.bmw.com/fr/fr/newvehicles/3series/convertible/2010/showroom/dynamics/active_steering.html

¹⁶ http://www.lexus.com/models/LS/features/performance/variable_gearratio_steering_vgrs_ls_460_1.html

¹⁷ http://www.audi.com/com/brand/en/tools/advice/glossary/dynamic_steering.browser.html

¹⁸ μ -split : Situation de conduite où l'adhérence de la route est différente sous les roues du véhicule. Ce phénomène est souvent rencontré sur routes enneigées.

paramètres de retour d'effort du volant (ce changement intervenant en ligne droite passe inaperçu, car le couple au volant est nul à ce moment), ils semblent ne pas s'en rendre compte, même après plusieurs virages. Différents profils de loi de commande sont testés sur un même circuit et il apparaît que les conducteurs s'adaptent très rapidement à toute modification du retour haptique, dans une certaine limite (pas d'adaptation des conducteurs à la loi d'assistance inversée, par exemple). Ils sont en mesure de poursuivre la réalisation de leur tâche, sans observer de dégradation de la performance en termes de suivi de trajectoire. Cependant, cette expérimentation n'explore pas les capacités adaptatives des conducteurs à des changements de démultiplication au volant.

Cet aspect est abordé dans une étude menée par (*Chai, 2004*), sur un véhicule SBW, dont la démultiplication et le niveau de couple volant sont paramétrables. Nous apprenons que pour une même tâche de changement de file, les conducteurs préfèrent conserver un retour d'effort constant, quel que soit le gain de démultiplication. Ainsi, si on introduit un gain sur la démultiplication du véhicule (permettant ainsi au conducteur de tourner deux fois moins le volant pour une même tâche), il faut l'appliquer également au retour d'effort volant, afin que le couple reste identique. En d'autres termes, le retour d'effort doit être corrélé à la dynamique du véhicule plutôt qu'à l'angle du volant. L'expérimentation met en évidence le fait que les conducteurs, pour exécuter une manœuvre de changement de file à 60 km/h, préfèrent le gain de démultiplication double à la direction nominale, mais à condition que le couple volant soit proportionnel à cette démultiplication. L'application d'un gain double sur la démultiplication doit donc de préférence s'accompagner d'un gain identique sur le couple volant. L'auteur constate également qu'il est possible d'augmenter ce gain à un facteur 4, sans dégrader de la performance, mais en baissant la vitesse d'exécution de la tâche. Sinon, le volant est jugé "trop sensible" par les participants.

9.3 Dispositif expérimental

Cette expérimentation a été réalisée sur le simulateur Cards, au Centre Technique de Simulation du constructeur Renault. Nous avons choisi de laisser le simulateur en mode statique afin de limiter notre étude aux interactions visuo-haptiques, sans faire intervenir la modalité vestibulaire pendant le slalom.

Le simulateur Cards est équipé d'un volant à direction assistée électrique, de série sur les véhicules Renault. La stratégie de retour d'effort est reproduite par un modèle Matlab/Simulink. Le couple consigne ainsi calculé en fonction du couple conducteur, de la vitesse du véhicule et de l'angle de rotation du volant ; est transmis au volant par l'intermédiaire d'une communication CAN. Nous avons développé une interface graphique permettant d'appliquer "à la volée", pendant la simulation, un gain sur l'angle appliqué au volant et un autre sur le couple restitué par le volant.

9.4 Tâche expérimentale

Nous demandons aux conducteurs de réaliser un enchainement de slaloms sur une route droite (*Figure 50*). Ce slalom est composé de deux parties, et chaque partie est composée d'un slalom court. Afin de délimiter la trajectoire à suivre, nous avons disposé des plots deux par deux sur la route, de manière à former des portes successives dans lesquelles il faut passer. Les plots sont volontairement rapprochés car nous voulons mettre les conducteurs dans une situation d'adaptation permanente. En effet, pour avoir testé le slalom, on a tendance à sous-estimer l'angle au volant nécessaire pour y parvenir, tellement les plots sont serrés. Bien sûr, après une phase d'entraînement, tous les participants y parviennent sans problème.

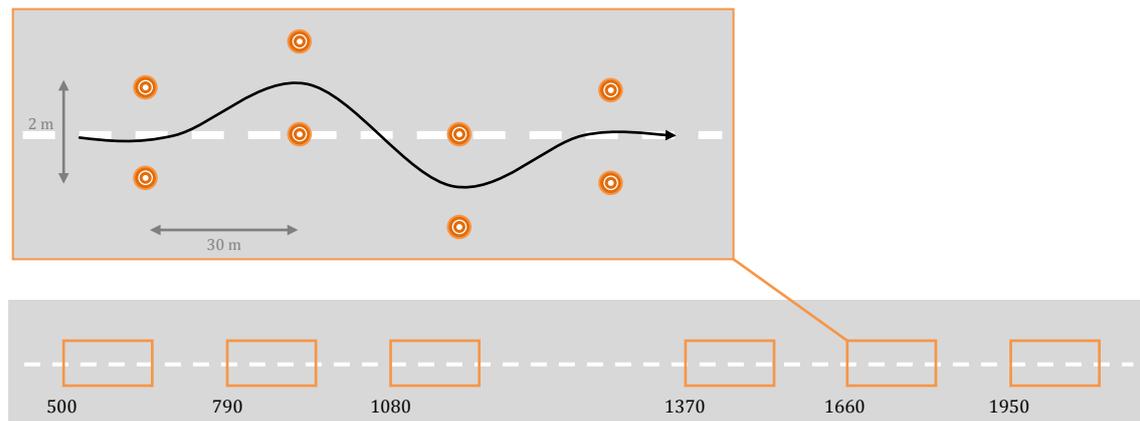


Figure 48 : Les rectangles orange sur la route, représentent les 6 slaloms courts que les participants doivent réaliser, avec leurs abscisses respectives. Au dessus, un agrandissement d'un slalom court avec le positionnement des plots sur la route.

9.5 Protocole

5 participants, âgés de 26 à 39 ans, ont réalisé ce protocole. Tous sont détenteurs d'un permis de conduire, et pratiquent la conduite quotidiennement. Dans un premier temps, nous avons demandé aux sujets de réaliser les 6 slaloms qui composent le parcours expérimental. Cette tâche a été répétée jusqu'à ce que les conducteurs se sentent à l'aise avec la conduite sur simulateur, et la tâche expérimentale.

Puis, nous avons demandé à chaque participant de réaliser deux conduites. Dans chaque conduite, les trois premiers slaloms se font en condition nominale : S_n (pas de modification de la démultiplication et du couple au volant). Pour les trois derniers slaloms, les conducteurs sont soumis, lors de la première conduite, à la condition : S_d (gain double sur la démultiplication). Puis, à la deuxième conduite, ils sont soumis à la condition : $S_d \& c$ (gain double sur la démultiplication et le couple volant).

Le protocole a été conçu pour fournir des préconisations à la conception d'une direction à démultiplication variable. Cette expérimentation très appliquée nous

permet de mesurer les réactions des conducteurs à l'application soudaine d'un gain de démultiplication, lorsque ce dernier est accompagné, ou pas, du même gain au retour d'effort volant.

Dans cette expérimentation, nous n'avons pas prévu de condition complémentaire à S_d , i-e appliquer un gain au couple du volant sans gain de démultiplication. Cette configuration n'a aucune raison d'être en automobile. Augmenter le couple au volant ne peut se justifier que par une augmentation de la démultiplication, car les constructeurs cherchent plutôt à minimiser ce couple afin de reposer les bras des conducteurs et augmenter le confort de conduite.

9.6 Résultats

Pour chaque sujet, et chaque condition expérimentale, nous avons calculé l'écart-type de la vitesse du volant et du couple conducteur. Nous avons également calculé le paramètre Δ *angle volant* : différence pas à pas de l'angle au volant entre, d'une part, les trois premiers slaloms (paramètres de référence au volant) et d'autre part, les trois derniers (application de gains au volant). Pour cela, nous avons ré-échantillonné l'angle au volant en fonction de l'abscisse de la route.

A l'aide du logiciel Statistica©, nous avons réalisé des tests de Shapiro sur les deux échantillons : écart-type couple conducteur et écart-type vitesse volant.

Si l'on prenne en compte les essais témoins (3 premiers slaloms en conditions initiales), ces deux paramètres d'intérêt suivent une loi normale (*Figure 49*).

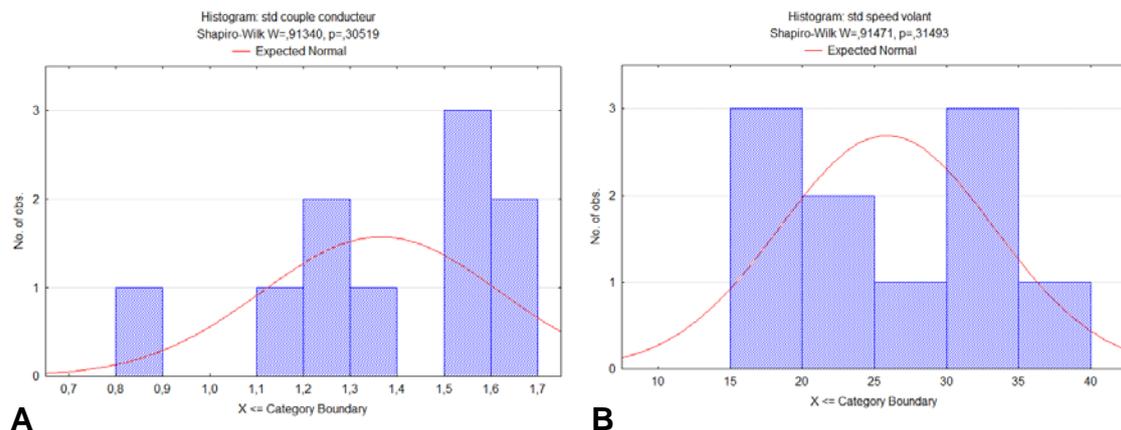


Figure 51 : Distribution de nos deux paramètres d'intérêt, en tenant compte des essais témoins, on constate que l'ensemble de nos échantillons suivent une loi normale. **A** : Ecart-type couple conducteur. **B** : Ecart-type vitesse volant.

Nous avons ensuite utilisé une ANOVA pour établir l'existence de différences significatives entre les conditions, pour chaque paramètre. Puis nous avons approfondi l'analyse par des comparaisons planifiées, afin de calculer des coefficients de significativité entre les différentes conditions (*Table 2*).

	Std (couple conducteur)	Std (vitesse volant)
<i>Sn vs Sd</i>	NS	NS
<i>Sn vs Sd&c</i>	p = 0,049688	p = 0,015946
<i>Sd vs Sd&c</i>	p = 0,020612	NS

Table 2 : significativité des comparaisons planifiées pour les écarts types du couple conducteur et de la vitesse au volant.

Pour finir, nous avons demandé à chaque participant de donner une note par condition (*Sd* et *Sd&c*), comprise entre "1" et "5", sur le jugement de l'évolution des caractéristiques du volant entre les 3 premiers slaloms et les 3 derniers. Cette démarche nous permet, au delà des critères objectifs de la conduite (tels que l'angle au volant, la vitesse de rotation du volant, l'écart sur la voie...), d'évaluer l'appréciation subjective des conducteurs (*Table 3*)

	Sujet A	Sujet B	Sujet C	Sujet D	Sujet E
<i>Sd</i>	2	3	2	2	3
<i>Sd&c</i>	4	3	3	4	2

*Table 3 : Evaluation subjective du ressenti conducteur sur le contrôle du véhicule, pour les conditions *Sd* et *Sd&c*.*

9.7 Discussion

9.7.1 Analyse qualitative

En observant qualitativement, pour un sujet donné, l'évolution de l'angle au volant et de la trajectoire, pour les deux conditions expérimentales (*Sd* et *Sd&c*), nous remarquons une superposition assez fiable de ces deux paramètres (*Figure 60*). Seul le 4^{ème} slalom semble engendrer des actions nettement différentes au volant, ce qui implique un écart de trajectoire entre les deux conditions. Dans la condition *Sd*, le conducteur a tendance à trop tourner le volant lorsqu'il attaque le 4^{ème} slalom, juste après l'introduction d'un gain de démultiplication. Le conducteur est alors obligé de faire plusieurs corrections par des oscillations du volant d'assez grande amplitude afin de recoller à la trajectoire planifiée. Cet écart disparaît progressivement sur les derniers slaloms. Chez d'autres sujets, cette adaptation peut se faire plus rapidement, en un slalom, voire à la première rotation du volant après introduction d'un gain (*Sd* ou *Sd&c*). Les conducteurs semblent assimiler et s'adapter très rapidement au nouveau paramétrage du volant.

À l'inverse, d'après les courbes tracées, la condition *Sd&c* ne pose les mêmes problèmes aux conducteurs. Les profils de rotation du volant et de trajectoire sont les mêmes qu'avec les paramètres de référence du volant. L'introduction d'un gain de retour d'effort, identique au gain de démultiplication, semble éviter les corrections excessives observées après l'introduction d'un gain de démultiplication seul.

Afin d'expliquer ces observations, nous pensons qu'au cours de la phase d'entraînement, en conditions initiales, le conducteur se forge un modèle interne des angles et efforts à appliquer au volant pour réaliser la tâche de slalom demandée. Au fur et à mesure que ce modèle inverse se consolide, la stratégie de modulation d'impédance des muscles par co-contraction est délaissée au profit de la stratégie des modèles inverses (*Gribble & al, 2003*).

Lorsque le gain de démultiplication est appliqué, les conducteurs s'aperçoivent qu'il y a eu perturbation des paramètres du volant. En effet, leur modèle interne (boucle ouverte), entraîne dès le premier coup de volant une erreur de trajectoire. Cela déclenche chez les conducteurs une co-contraction des muscles des bras, entraînant une augmentation de leur impédance cette fois. Cette stratégie est efficace pour minimiser les perturbations, mais lorsque le conducteur doit corriger sa trajectoire, l'importante raideur des bras s'avère pénalisante, puisqu'elle entraîne des oscillations du volant de grande amplitude (*Figure 52*).

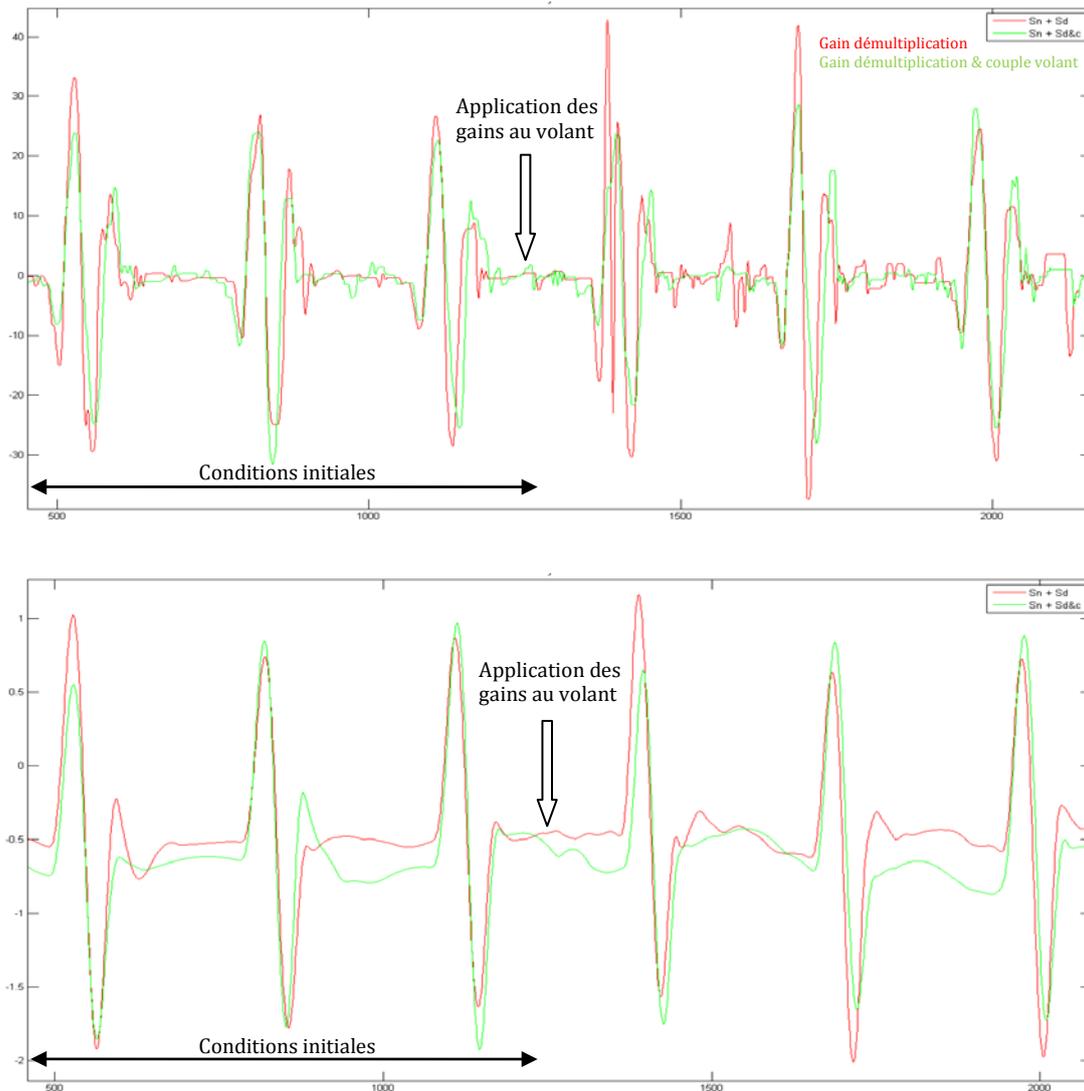


Figure 50 : En rouge, la condition Sd . En vert, la condition $Sd\&c$. En haut, évolution de l'angle au volant en fonction de la distance parcourue. En bas, évolution de la position latérale du véhicule sur la voie en fonction de la distance parcourue.

9.7.2 Rééquilibrage des modalités : visuelle et haptique

Le choix d'une tâche de slalom nous permet d'éliminer les contours de la route, indispensables à l'utilisation de la méthode du "tangent point". En effet, l'utilisation de cette méthode a tendance à favoriser la perception visuelle, puisqu'elle constitue un indice visuel fort pour estimer la courbure de la trajectoire à emprunter. Elle confère par la même occasion une estimation assez précise de l'angle que le conducteur devra appliquer au volant, avant même d'entrer dans la trajectoire courbe.

Dans cette expérimentation, nous avons voulu analyser le rôle du visuel et de l'haptique en boucle fermée, i-e uniquement la composante adaptative du contrôle moteur, en limitant au maximum la composante d'anticipation (*Wallis & al, 2007*). Le

slalom permet également, en imposant des manœuvres rapides aux conducteurs, de limiter encore plus leur anticipation, puisqu'ils ont moins le temps d'apprécier à l'avance la trajectoire. Par conséquent, ils doivent sans cesse faire des corrections pour bien négocier le passage des plots.

En faisant cela, nous favorisons l'utilisation de la méthode du "gaze sampling" (Kandil & al, 2009). Les conducteurs fixent des points successifs sur la trajectoire qu'ils veulent suivre. Puis, en fonction de la forme que prend le flux rétinien (Figure 29), ils corrigent leur trajectoire. L'avantage est que les deux modalités, visuelle et haptique, sont à égalité. En limitant au maximum la composante d'anticipation du visuel, on rapproche les caractéristiques de cette modalité de la modalité haptique.

9.7.3 Adaptation sensorimotrice aux gains de démultiplication et de couple

Sur l'écart type du couple conducteur, on observe, pour l'ensemble des sujets, une augmentation significative dans la condition *Sd&c*, par rapport à la condition *Sn* ($p=0,049688$) et par rapport à la condition *Sd* ($p=0,020612$). En effet, la condition *Sd&c* est la seule où un gain est appliqué au couple volant. Puisque, le couple est proportionnel à l'angle au volant, d'après la stratégie classique d'assistance au volant, le fait d'appliquer un gain double implique que les niveaux de couple atteignent des extremums plus grands dans la condition *Sd&c*. Or, dans une tâche de slalom, la moyenne de l'angle au volant, et du couple conducteur est quasi-nulle. Cela se traduit donc par une augmentation de l'écart type du couple conducteur (Figure 53).

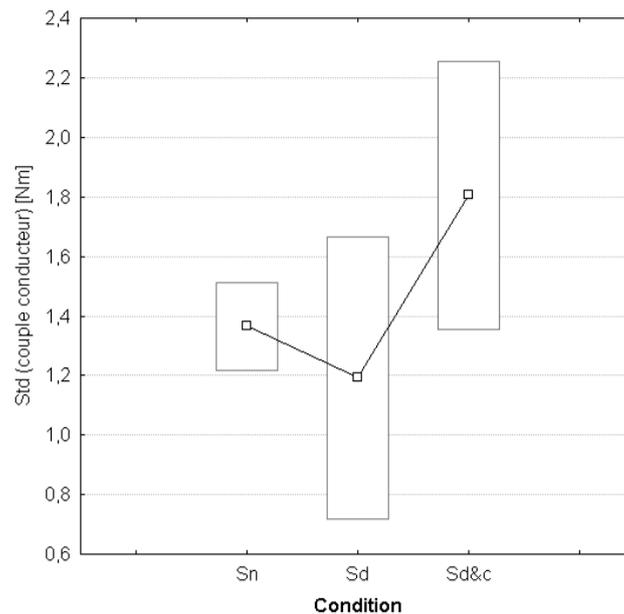


Figure 51 : Ecart type du couple conducteur, pour l'ensemble des sujets, sur les trois conditions *Sn*, *Sd*, *Sd&c*

Malgré cette augmentation du niveau global du couple au volant, d'après (*Toffin & al, 2003*), les conducteurs sont capables de s'adapter très rapidement à toute modification du retour d'effort au volant. Cela montre, qu'en termes de "dureté du couple au volant", l'application d'un gain ne dégrade pas la performance de contrôle par le conducteur.

Nous utilisons également l'écart type de la vitesse du volant pour avoir un indicateur sur le niveau des corrections effectuées par les conducteurs (*Figure 54*). Si ce paramètre est grand, donc si la variabilité de la vitesse du volant est importante, il est probable que les conducteurs imposent un mouvement oscillatoire au volant pour coller à la trajectoire qu'ils veulent suivre. Si ce paramètre est faible, cela voudrait dire que les conducteurs tournent le volant de manière fluide, sans avoir besoin d'effectuer trop de corrections.

En observant ce paramètre, on constate qu'il est significativement supérieur dans la condition *Sn* par rapport à la condition *Sd&c* ($p=0,015946$). Aucune différence significative n'est constatée entre les autres conditions. Dans les deux conditions (*Sd* et *Sd&c*), les conducteurs paraissent adapter rapidement la vitesse de leurs mouvements au gain de démultiplication appliqué. En effet, avec une direction plus sensible, les conducteurs montrent qu'ils sont capables de réduire la variabilité de la vitesse du volant, afin de ne pas perturber la dynamique du véhicule par des corrections de trajectoire trop importantes.

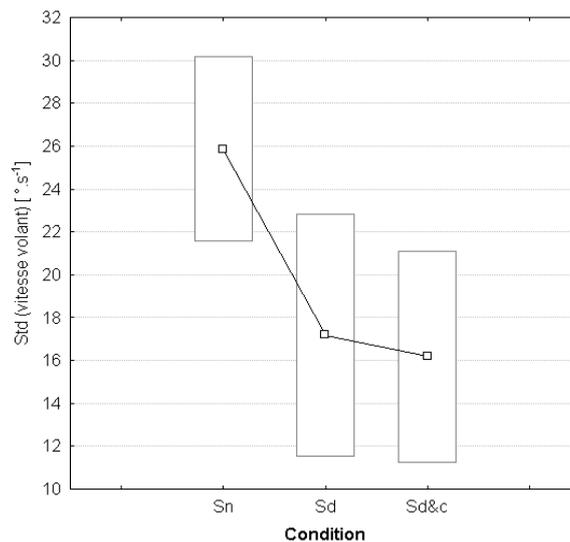


Figure 52 : Ecart type de la vitesse de rotation du volant, pour l'ensemble des sujets, sur les trois conditions *Sn*, *Sd*, *Sd&c*

D'autres indicateurs permettent de pencher en faveur d'une adaptation complète du contrôle du volant par les conducteurs, lors de l'introduction de gains. Nous avons choisi de tracer, pour chaque condition, la moyenne et l'écart-type du paramètre préalablement calculé $\Delta_{\text{angle volant}}$ (*Figure 55*). Nous constatons que l'écart est très proche entre les conditions *Sd* et *Sd&c*. En effet, les moyennes et écarts types de $\Delta_{\text{angle volant}}$ sont presque identiques.

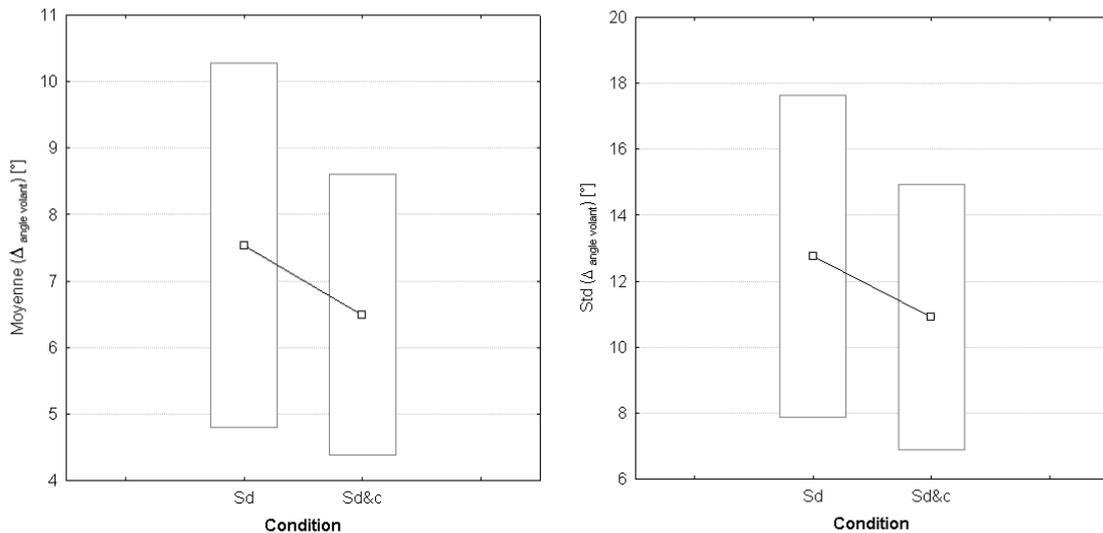


Figure 53 : Moyennes et écarts types de Δ angle volant : différence pour une même abscisse de la route, de l'angle au volant, entre les trois premiers slaloms (S_n) et les trois derniers (S_d ou $S_d\&c$).

Même si nous ne sommes pas parvenus à démontrer explicitement notre intuition, i-e la préférable corrélation des gains de démultiplication et de couple au volant, celle-ci est néanmoins validée par (Chai, 2004), dans le cadre d'une tâche de changement de file à 60 km/h. Il en ressort que le retour d'effort doit de préférence être corrélé à la dynamique du véhicule, et plus précisément au niveau d'accélération latérale, plutôt qu'à l'angle au volant.

Cette préférence de corrélation du couple volant et de la démultiplication, vient d'un accroissement de la sensibilité de la direction, nécessitant une augmentation du niveau de couple global afin de stabiliser la manipulation du volant par le conducteur. En effet, l'augmentation du couple tend à diminuer la variance de l'angle au volant (Liu & Chang, 1995). Cette dernière observation est également vraie dans notre étude, mais nous n'observons pas de différence significative de la variance de l'angle volant entre les conditions S_d et $S_d\&c$.

9.7.4 Adaptation consciente ou inconsciente ?

Afin d'évaluer le jugement subjectif des conducteurs, nous avons demandé aux participants d'évaluer le confort perçu au volant. Il leur a été demandé de fournir deux notes : une pour la condition S_d et une pour la condition $S_d\&c$. Pour la condition S_d , la moyenne des notes est de 2,4. Pour la condition $S_d\&c$, elle monte à 3,2.

Nous constatons donc que les utilisateurs notent beaucoup mieux la condition $S_d\&c$ que la condition S_d . Ce résultat est corrélé par (Liu & Chang, 1995), pour qui le doublement du gain de démultiplication, non corrélé à un doublement du gain de couple volant, semble influencer négativement le jugement subjectif des conducteurs. Chez nos sujets, d'après la grande majorité des verbalisations recueillies, il semblerait

que le volant devient "trop sensible". Ce jugement intervient la plupart du temps lors du premier coup de volant, en entrée de slalom, juste après le changement de démultiplication. Il est surtout important de constater que l'adaptation quasi-instantanée observée chez les conducteurs, est bien une adaptation consciente. Comment expliquer que les sujets perçoivent consciemment la modification de démultiplication ?

La distorsion visuo-proprioceptive d'un mouvement doit vérifier des contraintes particulières si elle veut favoriser une adaptation motrice inconsciente du suivi de la trajectoire planifiée. Il existerait une relation invariante entre l'amplitude de la distorsion et sa détection consciente, qui serait proportionnelle à la vitesse initiale du mouvement. Cela suggère que la détection consciente d'une telle modification, s'appuie sur un système qui intègre les informations visuelle et motrice (*Knoblich & Kircher, 2004*). Dans le même ordre d'idées, (*Kagerer & al, 1997*) suggèrent qu'il est plus facile de s'adapter à une distorsion progressive qu'à une distorsion brutale du retour visuel. Ici c'est l'amplitude de la distorsion qui serait proportionnelle au degré de conscience de la détection. Et il semblerait, dans notre expérimentation, que notre gain double est trop fort pour favoriser une adaptation inconsciente des sujets.

Dès lors, nous pouvons penser qu'il serait plus facile aux conducteurs de s'adapter à un gain double, qu'il soit visuel ou haptique, s'il est progressif plutôt qu'appliqué en une fois. Ce résultat plaide en faveur de la direction à démultiplication variable, dont le changement de démultiplication est continu et progressif, puisqu'il est asservi à la vitesse du véhicule, dont l'inertie est assez importante pour ne pas imposer des changements brusques aux conducteurs.

9.8 Conclusion et perspectives

Dans cette étude, nous avons dégagé quelques préconisations pour la conception d'une direction à démultiplication variable. D'après nos observations, lorsqu'un gain est appliqué à la démultiplication de la direction, il est préférable d'appliquer le même gain au retour d'effort du volant, afin que les deux soient corrélés. Le retour d'effort ne sera donc pas proportionnel à l'angle au volant, mais plutôt au comportement dynamique du véhicule, et en particulier à l'accélération latérale, comme c'est le cas avec une direction classique. De plus, nous concluons que l'application d'un gain progressif sur la démultiplication de la direction est plus facile à gérer qu'une modification brutale de ce gain. Ce résultat plaide pour une direction à démultiplication variable dont le gain varie en fonction de la vitesse du véhicule. Pour finir, de même que l'application d'une distorsion sur le retour d'effort au volant ne dégrade pas la performance de suivi de trajectoire des conducteurs, nous avons constaté que l'introduction d'un gain de démultiplication ne dégrade pas non plus les performances du conducteur. La différence entre gain de retour d'effort et gain de démultiplication, réside dans le fait que le premier ne semble pas être perçu par les sujets, tandis que le second est consciemment détecté.

Des travaux ultérieurs pourraient servir à recruter plus de participants et réaliser davantage d'essais pour diminuer les marges d'erreur lors du traitement statistique des données. Il serait également intéressant d'aller jusqu'au seuil de perte de contrôle du

véhicule, ou un état dans lequel la performance de la tâche se dégraderait au-delà de l'acceptable. En d'autres termes, aller aux limites de la plasticité sensorimotrice du conducteur. Concrètement, il faudrait soumettre les conducteurs à des gains de plus en plus forts, jusqu'à ce que l'écart de trajectoires avec les conditions nominales dépasse un seuil, à partir duquel, la performance serait jugée inacceptable. Pour finir, il est une mesure que nous n'avons pas pu réaliser, et qui serait très éclairante sur la stratégie d'adaptation utilisée par les conducteurs. En effet, les mesures par EMG¹⁹, de l'activité électrique des muscles, nous aideraient à comprendre la stratégie utilisée par le système nerveux central pour contrôler le volant par un mécanisme de modulation d'impédance des bras.

¹⁹ Électromyogramme : Examen permettant de mesurer l'activité électrique d'un muscle.

Synthèse et perspectives

Dans cette thèse, nous avons employé une approche pluridisciplinaire pour étudier le couplage visuo-haptique. Les sciences cognitives, les neurosciences, la psychophysique et la réalité virtuelle sont autant d'outils qui nous ont permis de mieux comprendre la notion de couplage visuo-haptique en conduite. Ce travail de recherche appliqué aux besoins de l'industrie automobile exclut d'entrée de jeu les approches fondamentales classiques de l'intégration multi-sensorielle. Les protocoles conçus doivent être, dans la mesure du possible, écologiques pour permettre de dégager des préconisations directement réutilisables par les métiers de Renault. En ce sens, nos travaux se rapprochent plus d'une activité de R&D que d'une approche fondamentale. D'ailleurs, nos résultats décrivent plus une analyse de la performance des conducteurs en présence d'une configuration visuo-haptique donnée, afin de mesurer l'impact d'une telle configuration sur le comportement sensorimoteur des conducteurs. Néanmoins, à travers ces cas pratiques, il est possible d'analyser le fonctionnement de l'intégration visuo-haptique, ainsi que les mécanismes d'adaptation de notre système visuo-haptique.

Effectivement, nous constatons, en cohérence avec la littérature (*Ernst & Banks, 2002*), que la pondération dynamique des indices visuels et haptiques dans l'intégration visuo-haptique semble s'opérer en fonction de la fiabilité de chaque modalité dans le contexte expérimental. En effet, qu'un bruit ou un gain soit à l'origine de la dégradation ou de la perturbation de l'une des deux modalités, le système visuo-haptique semble conserver une grande capacité d'adaptation aux conflits visuo-haptiques. Dans une certaine limite, l'adaptation se fait même de manière inconsciente. Puis, à partir d'un seuil de détection, l'adaptation devient consciente. Il est alors possible d'établir des stratégies d'adaptation telles que la modulation d'impédance ou la mise à jour du modèle interne de l'utilisateur.

Nous avons réalisé deux expérimentations au cours de ces travaux. Chacune d'elles a permis de définir un contexte et une problématique pour aborder les multiples facettes du fonctionnement du couplage visuo-haptique du conducteur.

Dans le domaine de l'assistance à l'éco-conduite, nous avons pu constater que les consignes basiques de conduite souple contribuent à la réduction de la consommation d'essence. L'ajout d'une assistance haptique ou visuelle améliore encore l'éco-performance des conducteurs, même si aucune interface ne semble meilleure que l'autre. En termes d'auto-amélioration et de workload conducteur par contre, la modalité haptique semble être plus efficace que la modalité visuelle. D'ailleurs, contrairement à notre intuition de départ, les premières utilisations de la pédale haptique semblent être bien tolérées par les conducteurs. Ces derniers appréhendent assez vite le fonctionnement de la pédale et apprennent à en tirer parti.

Pour concevoir une direction à démultiplication variable, il est préférable de corrélérer le gain de démultiplication avec le gain de retour d'effort, ressenti par les conducteurs au volant. Cette précaution permet de continuer à corrélérer le retour d'effort au volant avec l'accélération latérale du véhicule, ce qui est sa vocation première afin de fournir une information sur l'état d'adhérence du véhicule. Lorsqu'un

gain est appliqué au volant, les conducteurs, dont le modèle interne de la dynamique du véhicule est pris en défaut, s'adaptent très rapidement en utilisant une stratégie de modulation d'impédance des bras. Cette réaction inconsciente leur permet d'être plus robustes aux perturbations éventuelles. Puis, au fur et à mesure que leur modèle interne se met à jour, la stratégie d'anticipation de la réaction du système manipulé reprend progressivement le pas sur la stratégie de co-contraction des bras. Pour éviter cette rupture, il est préférable d'appliquer les gains de façon progressive afin de les rendre indétectables, dans une certaine mesure. Ce résultat serait vérifiable sur un véhicule dont l'évolution de la démultiplication serait proportionnelle à la vitesse.

Si l'on veut synthétiser ces résultats, il n'est pas difficile d'apercevoir un point commun entre les deux expérimentations menées. Malgré les différences de tâche et de contexte, nous pouvons constater que l'adaptation du système visuo-haptique est très efficace, que ce soit pour des sollicitations perceptives ou motrices. Nous prenons conscience de la formidable plasticité du système nerveux central, dont les mécanismes d'intégration visuo-haptique résistent, dans une certaine limite, à l'introduction d'un gain ou d'un bruit sur l'une ou l'autre des modalités. C'est d'ailleurs lorsque les sujets ignorent l'existence d'un conflit visuo-haptique que nous constatons que leurs capacités adaptatives sont les plus importantes.

Afin de donner une suite à ces travaux, il serait intéressant de confirmer la pertinence de la modalité haptique pour assister les conducteurs passivement ou activement. D'après nos travaux, il semblerait que le retour haptique offre de nombreux avantages sur le plan de la rapidité d'adaptation et de la disponibilité de la modalité haptique. Pour en avoir le cœur net, il serait utile d'utiliser la pédale à retour d'effort dans d'autres applications, comme le suivi de véhicules, ou la limitation de vitesses. Si l'on se limite au domaine de l'éco-conduite, il serait judicieux de créer un scénario, permettant de comparer l'éco-performance des conducteurs, tout en conservant la validité écologique de l'expérimentation. Cela nécessiterait d'introduire du trafic automobile afin de plonger les sujets dans un environnement réaliste. Pour ce qui est des gains au volant, nos résultats nous poussent à vérifier notre hypothèse qui consiste à dire que l'application d'un gain est moins susceptible d'être détectée si l'introduction de ce facteur d'échelle se fait progressivement. Dans le cas du volant, il serait intéressant de développer un démonstrateur de direction à démultiplication variable où la variation de démultiplication serait corrélée avec la vitesse du véhicule. Cette innovation a l'avantage de solliciter moins d'angle au volant lorsque la vitesse du véhicule est basse, comme dans une manœuvre de stationnement par exemple.

Références bibliographiques

- Abbink, D.A., van der Heim, F.C.T. & Boer, E.R., 2004. Admittance measurements of the foot during « maintain position »and' relax'tasks on a gas pedal. Dans IEEE, p. 2519-2524.
- Adell, E. & Várhelyi, A., 2008. Driver comprehension and acceptance of the active accelerator pedal after long-term use. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 11(1), p.37-51.
- Appelle, S. & Countryman, M., 1986. Eliminating the haptic oblique effect: influence of scanning incongruity and prior knowledge of the standards. *Perception*, 15(3), p.325-329.
- Appelle, S. & Gravetter, F., 1985. Effect of modality-specific experience on visual and haptic judgment of orientation. *Perception*, 14(6), p.763-773.
- Atkins, J E, Fiser, J. & Jacobs, R A, 2001. Experience-dependent visual cue integration based on consistencies between visual and haptic percepts. *Vision Research*, 41(4), p.449-461.
- Atkins, Joseph E, Jacobs, Robert A & Knill, D.C., 2003. Experience-dependent visual cue recalibration based on discrepancies between visual and haptic percepts. *Vision Research*, 43(25), p.2603-2613.
- Azzi, S. et al., 2011. Eco-Driving Performance Assessment With in-Car Visual and Haptic Feedback Assistance. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11(4), p.041005-5.
- Claes, V.H., 1976. The role of convergence in visual space perception. *Vision Research*, 16(2), p.193-198.
- Costantini, M. & Haggard, P., 2007. The rubber hand illusion: sensitivity and reference frame for body ownership. *Consciousness and Cognition*, 16(2), p.229-240.
- Cunningham, D.W. et al., 2001. Driving in the future: temporal visuomotor adaptation and generalization. *Journal of Vision*, 1(2), p.88-98.
- Cutting, J. & Vishton, P., 1995. Perceiving layout and knowing distances: The interaction, relative potency, and contextual use of different information about depth. Dans *Perception of space and motion*. p. 69-117.

- Dingus, T.A. et al., 1997. Effects of age, system experience, and navigation technique on driving with an advanced traveler information system. *Human Factors*, 39(2), p.177-199.
- Drewing, K. & Ernst, M.O., 2006. Integration of force and position cues for shape perception through active touch. *Brain Research*, 1078(1), p.92-100.
- Drewing, K., Wiecki, T.V. & Ernst, M.O., 2008. Material properties determine how force and position signals combine in haptic shape perception. *Acta Psychologica*, 128(2), p.264-273.
- Ernst, M.O., 2007. Learning to integrate arbitrary signals from vision and touch. *Journal of Vision*, 7(5), p.7.1-14.
- Ernst, M.O. & Banks, M.S., 2002. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870), p.429-433.
- Fisher, S.K., Ciuffreda, K.J. & Bird, J.E., 1988. The effect of monocular versus binocular fixation on accommodative hysteresis. *Ophthalmic & Physiological Optics: The Journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 8(4), p.438-442.
- Flanagan, J.R. & Rao, A.K., 1995. Trajectory adaptation to a nonlinear visuomotor transformation: evidence of motion planning in visually perceived space. *Journal of Neurophysiology*, 74(5), p.2174-2178.
- De Gelder, B. & Bertelson, P., 2003. Multisensory integration, perception and ecological validity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(10), p.460-467.
- Gentaz, E et al., 2001. The reproduction of vertical and oblique orientations in the visual, haptic, and somato-vestibular systems. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, 54(2), p.513-526.
- Gentaz, E & Hatwell, Y., 1996. Role of gravitational cues in the haptic perception of orientation. *Perception & Psychophysics*, 58(8), p.1278-1292.
- Gentaz, E & Hatwell, Y., 1995. The haptic « oblique effect » in children's and adults' perception of orientation. *Perception*, 24(6), p.631-646.
- Gentaz, E & Hatwell, Y., 1998. The haptic oblique effect in the perception of rod orientation by blind adults. *Perception & Psychophysics*, 60(1), p.157-167.
- Gentaz, Edouard & Streri, A., 2004. An « Oblique Effect » in infants' haptic perception of spatial orientations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(2), p.253-259.
- Gepshtein, S. et al., 2005. The combination of vision and touch depends on spatial proximity. *Journal of Vision*, 5(11), p.1013-1023.
- Gepshtein, S. & Banks, M.S., 2003. Viewing geometry determines how vision and haptics combine in size perception. *Current Biology: CB*, 13(6), p.483-488.

- Gergle, D., Kraut, R. & Fussell, S., 2006a. The impact of delayed visual feedback on collaborative performance. Dans Montréal, Québec, Canada: ACM, p. 1303-1312.
- Gergle, D., Kraut, R. & Fussell, S., 2006b. The impact of delayed visual feedback on collaborative performance. Dans Montréal, Québec, Canada: ACM, p. 1303-1312.
- Girard, J.-M. et al., 2007. Towards a real time workload of the driver: The analysis of driving performance evolution under overloaded conditions. Dans M. Daihwan, éd. p. 286-291.
- Gogel, W.C., 1961. Convergence as a cue to absolute distance. *Report. U.S. Army Medical Research Laboratory*, 467, p.1-16.
- Goodbody, S.J. & Wolpert, D.M., 1999. The effect of visuomotor displacements on arm movement paths. *Experimental Brain Research*, 127, p.213-223.
- Gordon, I.E. & Morison, V., 1982. The haptic perception of curvature. *Perception & Psychophysics*, 31(5), p.446-450.
- Gori, M. et al., 2008a. Young children do not integrate visual and haptic form information. *Current Biology: CB*, 18(9), p.694-698.
- Gori, M. et al., 2008b. Young children do not integrate visual and haptic form information. *Current Biology: CB*, 18(9), p.694-698.
- Graziano, M.S., 1999. Where is my arm? The relative role of vision and proprioception in the neuronal representation of limb position. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(18), p.10418-10421.
- Gribble, P.L. et al., 2003. Role of cocontraction in arm movement accuracy. *Journal of Neurophysiology*, 89(5), p.2396-2405.
- Hajnal, A. et al., 2007. Haptic selective attention by foot and by hand. *Neuroscience Letters*, 419(1), p.5-9.
- Harms, L. & Patten, C., 2003. Peripheral detection as a measure of driver distraction. A study of memory-based versus system-based navigation in a built-up area. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 6(1), p.23-36.
- Harrar, V. & Harris, L.R., 2005. Simultaneity constancy: detecting events with touch and vision. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*, 166(3-4), p.465-473.
- Helbig, H.B. & Ernst, M.O., 2008. Visual-haptic cue weighting is independent of modality-specific attention. *Journal of Vision*, 8(1).

- Hogan, N., 1984. Adaptive control of mechanical impedance by coactivation of antagonist muscles. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 29(8), p.681- 690.
- Jahn, G. et al., 2005a. Peripheral detection as a workload measure in driving: Effects of traffic complexity and route guidance system use in a driving study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(3), p.255-275.
- Jahn, G. et al., 2005b. Peripheral detection as a workload measure in driving: Effects of traffic complexity and route guidance system use in a driving study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(3), p.255-275.
- Jami, L., 1992. Golgi tendon organs in mammalian skeletal muscle: functional properties and central actions. *Physiological Reviews*, 72(3), p.623-666.
- Jamson, A.H., Whiffin, P.G. & Burchill, P.M., 2007. Driver response to controllable failures of fixed and variable gain steering. *International Journal of Vehicle Design*, 45(3), p.361 - 378.
- Kaas, A.L. et al., 2007. The effect of visuo-haptic congruency on haptic spatial matching. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*, 183(1), p.75-85.
- Kagerer, F.A., Contreras-Vidal, J.L. & Stelmach, G.E., 1997. Adaptation to gradual as compared with sudden visuo-motor distortions. *Experimental Brain Research*, 115, p.557-561.
- Kandil, F.I., Rotter, A. & Lappe, M., 2010. Car drivers attend to different gaze targets when negotiating closed vs. open bends. *Journal of Vision*, 10(4).
- Kandil, F.I., Rotter, A. & Lappe, M., 2009. Driving is smoother and more stable when using the tangent point. *Journal of Vision*, 9(1).
- Kemeny, A. & Panerai, F., 2003. Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), p.31-37.
- Kersten, D. & Legge, G.E., 1983. Convergence accommodation. *Journal of the Optical Society of America*, 73(3), p.332-338.
- Kerzerho, S., Gentaz, Edouard & Streri, A., 2008. Influence of visual contextual cues on haptic discrimination of orientations in 5-month-old infants. *Brain Research*, 1242, p.276-282.
- Kerzerho, S., Streri, A. & Gentaz, Edouard, 2005. Reference frame and haptic discrimination of orientations in infants. *Neuroreport*, 16(16), p.1833-1837.
- Knoblich, G. & Kircher, T.T.J., 2004. Deceiving Oneself about Being in Control: Conscious Detection of Changes in Visuomotor Coupling. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 30(4), p.657-666.

- Kuge, N. et al., 2006a. *Study on Driver's Car Following Abilities Based on an Active Haptic Support Function*, Warrendale, PA: SAE International.
- Kuge, N. et al., 2006b. *Study on Driver's Car Following Abilities Based on an Active Haptic Support Function*, Warrendale, PA: SAE International.
- Lackner, J.R. & DiZio, P., 2005. Motor control and learning in altered dynamic environments. *Current Opinion in Neurobiology*, 15(6), p.653-659.
- Land, M.F. & Lee, D.N., 1994. Where we look when we steer. *Nature*, 369(6483), p.742-744.
- Lechelt, E C & Verenka, A., 1980. Spatial anisotropy in intramodal and cross-modal judgments of stimulus orientation: the stability of the oblique effect. *Perception*, 9(5), p.581-589.
- Lechelt, Eugene C., Eliuk, J. & Tanne, G., 1976. Perceptual orientational asymmetries: A comparison of visual and haptic space. *Perception & Psychophysics*, 20, p.463-469.
- Leibowitz, H.W., Shiina, K. & Hennessy, R.T., 1972. Oculomotor adjustments and size constancy. *Perception & Psychophysics*, 12, p.497-500.
- Liu, A. & Chang, S., 1995. Force feedback in a stationary driving simulator. Dans , IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1995. Intelligent Systems for the 21st Century. IEEE, p. 1711-1716 vol.2.
- Ma, R. & Kaber, D.B., 2005. Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(10), p.939-953.
- Matthews, R., Legg, S. & Charlton, S., 2003. The effect of cell phone type on drivers subjective workload during concurrent driving and conversing. *Accident Analysis & Prevention*, 35(4), p.451-457.
- McGurk, H. & Power, R.P., 1980. Intermodal coordination in young children: Vision and touch. *Developmental Psychology*, 16, p.679-680.
- Merat, N. & Jamson, A.H., 2008. The Effect of Stimulus Modality on Signal Detection: Implications for Assessing the Safety of In-Vehicle Technology. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(1), p.145 -158.
- Mon-Williams, M. & Tresilian, J.R., 1999. The size-distance paradox is a cognitive phenomenon. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*, 126(4), p.578-582.
- Mugge, W. et al., 2010. A rigorous model of reflex function indicates that position and force feedback are flexibly tuned to position and force tasks. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*, 200(3-4), p.325-340.

- Mulder, M et al., 2008. Haptic gas pedal feedback. *Ergonomics*, 51(11), p.1710-1720.
- Mulder, Max et al., 2004. Car-following support with haptic gas pedal feedback. , 3(1), p.117-123.
- Newport, R., Rabb, B. & Jackson, S.R., 2002. Noninformative Vision Improves Haptic Spatial Perception. *Current Biology*, 12(19), p.1661-1664.
- Noh, T. et al., 2007. *A Control Strategy to Compensate the Reaction Torque of Active Front Steering System*, Warrendale, PA: SAE International.
- Patten, C.J.D. et al., 2006. Driver experience and cognitive workload in different traffic environments. *Accident; Analysis and Prevention*, 38(5), p.887-894.
- Patten, C.J.D. et al., 2004. Using mobile telephones: cognitive workload and attention resource allocation. *Accident; Analysis and Prevention*, 36(3), p.341-350.
- Pick, A.J. & Cole, D.J., 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), p.1475 -1486.
- Pick, A.J. & Cole, D.J., 2006. Neuromuscular dynamics in the driver-vehicle system. *Vehicle System Dynamics*, 44, p.624-631.
- Popieul, J.-C., Simon, P. & Loslever, P., 2007. Evaluation of driver assistance systems: An approach based on the exploratory analysis of temporal data. Dans M. Daihwan, éd. p. 324-329.
- Recarte, M.A. & Nunes, L.M., 2003. Mental workload while driving: effects on visual search, discrimination, and decision making. *Journal of Experimental Psychology. Applied*, 9(2), p.119-137.
- Reimer, B. et al., 2010. The Impact of Systematic Variation of Cognitive Demand on Drivers Visual Attention across Multiple Age Groups. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 54(24), p.2052-2056.
- Richards, W. & Miller, J.F., 1969. Convergence as a cue to depth. *Perception & Psychophysics*, 5, p.317-320.
- Robertshaw, K.D. & Wilkie, R.M., 2008. Does gaze influence steering around a bend? *Journal of Vision*, 8(4).
- Robles-De-La-Torre, G. & Hayward, V., 2001. Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch. *Nature*, 412(6845), p.445-448.
- Shimada, S., Fukuda, K. & Hiraki, K., 2009. Rubber hand illusion under delayed visual feedback. *PloS One*, 4(7), p.e6185.
- Sinai, M.J., Ooi, T.L. & He, Z.J., 1998. Terrain influences the accurate judgement of distance. *Nature*, 395(6701), p.497-500.

- Sodnik, J. et al., 2008. A user study of auditory versus visual interfaces for use while driving. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66, p.318-332.
- Srinivasan, R. & Jovanis, P.P., 1997. Effect of selected in-vehicle route guidance systems on driver reaction times. *Human Factors*, 39(2), p.200-215.
- Summala, H., Lamble, D. & Laakso, M., 1998. Driving experience and perception of the lead car's braking when looking at in-car targets. *Accident; Analysis and Prevention*, 30(4), p.401-407.
- Toffin, D. et al., 2003. Perception and Reproduction of Force Direction in the Horizontal Plane. *Journal of Neurophysiology*, 90(5), p.3040 -3053.
- Tsakiris, M. & Haggard, P., 2005. The rubber hand illusion revisited: visuotactile integration and self-attribution. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 31(1), p.80-91.
- Várhelyi, A. et al., 2004. Effects of an active accelerator pedal on driver behaviour and traffic safety after long-term use in urban areas. *Accident analysis and prevention*, 36(5), p.729-737.
- Vlassenroot, S. et al., 2007. Driving with intelligent speed adaptation: Final results of the Belgian ISA-trial. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(3), p.267-279.
- Wallis, G. et al., 2007. The role of visual and nonvisual feedback in a vehicle steering task. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 33(5), p.1127-1144.
- Warren, D.H. & Pick, H.L., 1970. Intermodality relations in localization in blind and sighted people. *Perception & Psychophysics*, 8, p.430-432.
- Welch, R., 1986. Adaptation of space perception. Dans John Wiley & Sons, p. 24-45.
- Wilkie, R. & Wann, J., 2003. Controlling steering and judging heading: retinal flow, visual direction, and extraretinal information. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 29(2), p.363-378.
- Wittmann, M. et al., 2006. Effects of display position of a visual in-vehicle task on simulated driving. *Applied Ergonomics*, 37(2), p.187-199.
- Wolpert, D., Ghahramani, Z. & Jordan, M., 1995. Are arm trajectories planned in kinematic or dynamic coordinates? An adaptation study. *Experimental Brain Research*, 103
- Zuidhoek, S. et al., 2004. Multisensory integration mechanisms in haptic space perception. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*, 157(2), p.265-268.

Annexes - articles rédigés

Les annexes contiennent deux articles écrits pendant la thèse. Le deuxième article, à paraître en décembre 2011 dans la revue JCISE, reprend le premier, présenté à la conférence DSC 2010, en l'enrichissant.

Eco-driving performance assessment with in-car visual and haptic feedback assistance

S. Azzi ^{1,2}, G. Reymond ¹, F. Mérienne ², A. Kemeny ^{1,2}

¹ RENAULT, Technical Centre for Simulation
1 Avenue du Golf – 78288 Guyancourt, France

² Arts et Métiers ParisTech, Le2i, CNRS, Institut Image
2 Rue Thomas Dumorey – 71100 Chalon sur Saône, France

Abstract

In this experiment, 28 participants completed an urban driving task in the CARDS simulator at Renault's Technical Centre for Simulation. This simulator, based on the SCANeR2[®] software package, provides a 150° field of view in a fully instrumented cockpit. Two different eco-driving assistance devices were added: a 7 inches display on the mid-console, and a force feedback system on the gas pedal. The feedback information was computed by comparing the car's instant acceleration with an optimal acceleration level based on a proprietary consumption model of a Renault diesel engine.

Basic eco-driving behaviors, like gear-shifting under 2000 Rpm, allows significant decrease of polluting emissions. Assisting drivers with visual, haptic, or visual-haptic on-board devices, in addition to low engine speed verbal instructions, lead to supplementary significant savings of polluting emissions. There is no significant difference between assistance feedback type; suggesting that haptic feedback provides the same eco-performance as visual feedback. In particular, subjects show good adaptation to the haptic feedback pedal at first utilization of the system. They apparently relied more on haptic modality to achieve the eco-driving task, when they used both visual and haptic assistance.

Résumé

Dans cette expérimentation, 28 participants accomplissent une tâche de conduite dans le simulateur CARDS du Centre Technique de Simulation de Renault. Ce simulateur, équipé du logiciel de simulation SCANeR2[®], délivre un angle de vue de 150° dans un cockpit entièrement instrumenté. Deux interfaces d'assistance à l'éco-conduite complètent le dispositif expérimental : un écran de 7 pouces sur la console centrale et un dispositif appliquant un retour d'effort à la pédale d'accélérateur. Le retour d'information est calculé en comparant l'accélération instantanée du véhicule à un niveau d'accélération optimal, d'après un modèle de consommation de moteur diesel Renault.

La pratique de l'éco-conduite, comme le changement de rapport sous les 2000 Rpm, permet de réduire significativement les émissions polluantes. L'assistance des conducteurs avec des systèmes d'aide visuel, haptique ou visuo-haptique, permet une réduction supplémentaire significative des émissions polluantes. Aucune différence significative n'a été constatée entre les différents modes d'assistance ; ce qui laisse penser que l'assistance haptique engendre la même éco-performance que l'assistance visuelle. En particulier, les sujets font preuve d'une adaptation satisfaisante à la pédale haptique lors d'une première utilisation du système. Ils accordent apparemment plus de confiance à la modalité haptique pour accomplir leur tâche d'éco-conduite en présence d'une assistance visuo-haptique.

Introduction

Context

Since the early seventies, the European Union has been controlling the polluting emissions of its vehicles by setting more and more drastic ecologic standards. From the early nineties, the development of the collective consciousness for ecology, associated to continuous fuel price increase urges countries to set up sustainable development plans for their vehicle market. In addition to the rules fixed to carmakers, actions have been led to sensitize car holders to eco-driving practicing. In particular, recently, eco-driving has been largely promoted by public organizations. Another way to provide help in eco-driving is to use an on-board assistance system with information on driving eco-efficiency. Feedback may be carried through various perceptive modalities: visual, auditory or haptic.

Visual assistance feedback

Nowadays, most of the cars are equipped with a digital information display of instant consumption. In order to enhance the visual salience of their consumption aid system, Honda has developed in 2009 a speedometer with changing colors, depending on drivers' instantaneous eco-performance [Honda]. However, drivers' visual attention is mainly focused on the road. By submitting driving participants to other visual on-board detection tasks, it is suggested that visual stimulus detection performance deteriorates, while reaction delay remains unaffected [Recarte & al, 2003]. Moreover, lane keeping and keeping distance to followed car, with the help of peripheral vision, appears to be impaired when watching a visual display on the speedometer, which is otherwise inefficient when the visual display is on the mid-console [Summala & al, 1998].

Haptic assistance feedback

Haptic stimulation through gas pedal is another way to provide feedback information on eco-performance. Continental has developed an accelerator force feedback pedal AFFP[®] [Continental], which vibrates to inform drivers on optimal gear-shifting time. Nissan proposes since 2009 an ECO Pedal[®] [Nissan] to provide force feedback information on optimal pedal position, depending on engine state. Both announce fuel savings of between 5 and 10%. Haptic feedback pedal has already been studied in long-term and large field studies for speed limitation requirements. In this particular application, haptic appears to be more efficient than visual assistance. Significant decreases of mean and variation of speed, as well as polluting emissions are observed [Várhelyi & al, 2004]. Haptic feedback pedal acceptance is positively rated by drivers, but there is no willingness to pay for it [Adell & al, 2008].

In car following applications, haptic feedback pedal systems give information on inter-vehicular distance by modifying the gas pedal stiffness proportionally to the distance separating subject to forward car. This system

allows significant decrease of standard deviation of inter-vehicle distance and braking reaction time [Kuge & al, 2005; Mulder & al, 2008].

Problematic

In this study, we aim at evaluating the efficiency of basic eco-driving instructions for polluting emissions reduction. We also try to assess and compare the additional improvements brought by the visual, haptic and coupled visual-haptic eco-driving assistances. Finally, we test whether drivers feel at ease at a first utilization of the force feedback pedal, which intuitively could appear as very intrusive in the control of the car.

Method

Experimental device

This experiment has been conducted on the dynamic driving simulator CARDS at the Technical Center for Simulation of Renault. This simulator based on the SCANeR2[®] simulation software is composed of a modular cockpit, completely instrumented, providing to the driver all the equipments and interactions existing in a real car. The front view is provided by 3 projectors delivering a 150° horizontal field of view image.

For experimental needs, the simulator has been enriched with two eco-driving assistance devices: a visual interface positioned in front of the central console with a progression bar, provides a visual information on $F_{\text{additional}}$ value; and a gas pedal coupled with an actuator stimulates haptically driver's foot by superposing $F_{\text{additional}}$ to the initial pedal torque. These two devices provide exactly the same information to drivers through different modalities.

A Renault's proprietary eco-driving model (see Fig 1) compares in real time the longitudinal acceleration of the driven vehicle (Acc_veh) to an optimal acceleration level, depending on car speed (Acc_opt). This model does not take in account the engine revolution speed. When the drivers' acceleration is over the optimal acceleration, a normalized counter-acting force ($F_{\text{additional}}$), proportional to the gas pedal position (X_{pedal}), is opposed to drivers' foot (see Fig 1). Gas pedal force was equal to 35N when (Acc_veh) reached twice (Acc_opt).

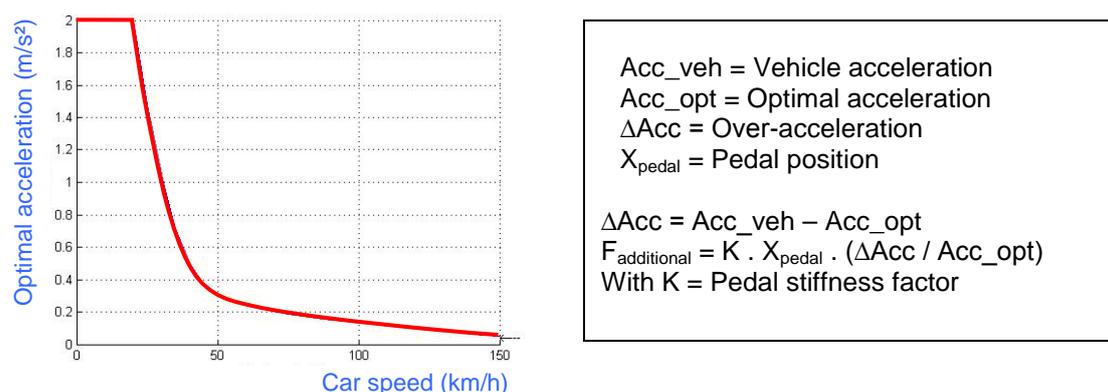


Fig 1: Schematics of Renault's proprietary eco-driving model (left); and calculation of $F_{\text{additional}}$ (right)

Protocol

Task description

The experimental task consists in driving through an urban environment, along a predefined route. No car traffic is present, to facilitate control task repeatability and compare more efficiently eco-driving performances between experimental conditions.

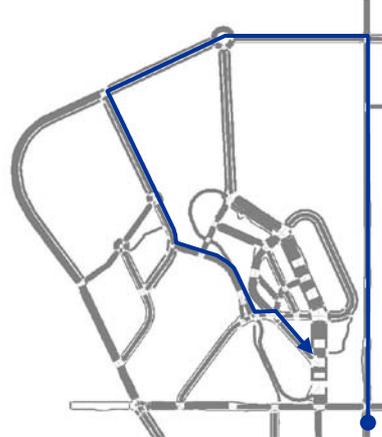


Fig 2: Picture of the CARDS simulator, with mid-console assistance display (left); experimental database with predefined route (right).

Participants

28 subjects aged between 25 and 45 took part in the experiment (7 females and 21 males). All drivers were in possession of a valid driving license. Participants were split into 4 distinct groups of 7 subjects. Three groups were given assistance feedback at third trial: the visual group (S_v) had a visual assistance display; the haptic group (S_h), was assisted with the haptic pedal; and the visual-haptic group (S_{vh}), had both visual and haptic assistance. Fourth group is the reference group (S_n), no assistance was provided, drivers had to accomplish the verbally instructed condition.

Conditions

Initially, participants had to follow a training session, during which, drivers were asked to accomplish two practice runs in order to get used to drive comfortably with the CARDS simulator and to memorize the experimental task path. Participants in assisted groups drove 1 minute more to understand the functioning of the assistance system to use. After practicing, all participants confirmed that they felt at ease with the whole experimental device.

Participants drove the same route four times in different conditions: ($T1_{ref}$) Normal driving without instructions nor assistance; ($T2_{eco-behavior}$) Driving with the verbal instruction not to exceed 2000 Rpm; ($T3_{eco-assistance}$) Same as condition 2 with the support of an assistance feedback; ($T4_{eco-behavior}$) A repetition of trial ($T2$).

Data recordings

The following objective data was recorded for each subject:

- Total polluting emissions, calculated on the base of a Renault proprietary model of fuel consumption of a Megane diesel car.
- $\text{Std}(X_{\text{pedal}})$, the standard deviation of gas pedal position, calculated on the whole trajectory for each run.
- $\text{Mean}(\Delta\text{Acc})$, the mean of over-acceleration, resulting from the difference between $(\text{Acc}_{\text{veh}})$, the instantaneous longitudinal acceleration of the car, and $(\text{Acc}_{\text{opt}})$, the optimal acceleration depending on car speed, given by the Renault proprietary eco-rule.

Results

We performed an ANOVA planned comparison with $\alpha = 0,05$ on these parameters (see Table 1).

A comparison between $T1_{\text{ref}}$ and $T2_{\text{eco-behavior}}$ was computed among all subjects. A significant decrease was observed on our parameters of interest.

A between group comparison on assisted trial $T3_{\text{eco-assistance}}$ was computed, to evaluate the benefit of each assistance, compared to the reference unassisted group (S_n), with verbal instruction to drive at low engine speed. Assistance systems induced a significant decrease. However, there were no significant effects of the type of assistance feedback.

By comparing, into each assisted group, verbally instructed runs (mean of $T2_{\text{eco-behavior}} + T4_{\text{eco-behavior}}$) to assisted runs $T3_{\text{eco-assistance}}$ ($T2$ and $T4$ serves to cancel the bias due to learning effects of low engine speed driving across the three last trials), visual assistance do not lead to significant improvements for any of the parameters of interest. In the haptically assisted group, total polluting emissions is the only result which is not significantly improved. In visual-haptic group, all the recorded parameters are significantly reduced.

	Total polluting emissions	Std (X_{pedal})	Mean (ΔAcc)
All subjects ($T1_{\text{ref}}$ vs $T2_{\text{eco-behavior}}$)	$F(1,88) = 19,87; p < 0.001$	$F(1,88) = 25,85; p < 0.001$	$F(1,88) = 23,15; p < 0.001$
S_v group ($T2 + T4$ vs $T3$)	NS	NS	NS
S_h group ($T2 + T4$ vs $T3$)	NS	$F(1,88) = 12,84; p < 0.001$	$F(1,88) = 6,62; p < 0.05$
S_{vh} group ($T2 + T4$ vs $T3$)	$F(1,88) = 4,32; p < 0.05$	$F(1,88) = 14,23; p < 0.001$	$F(1,88) = 9,38; p < 0.005$
$T3_{\text{eco-assistance}}$ trials (S_n vs S_v)	$F(1,88) = 4,69; p < 0.05$	$F(1,88) = 5,45; p < 0.05$	$F(1,88) = 4,42; p < 0.05$
$T3_{\text{eco-assistance}}$ trials (S_n vs S_h)	$F(1,88) = 5,74; p < 0.05$	$F(1,88) = 5,68; p < 0.05$	$F(1,88) = 6,35; p < 0.05$
$T3_{\text{eco-assistance}}$ trials (S_n vs S_{vh})	$F(1,88) = 7,51; p < 0.01$	$F(1,88) = 7,55; p < 0.01$	$F(1,88) = 7,86; p < 0.005$

Table 1: Results of the ANOVA planned comparison analysis

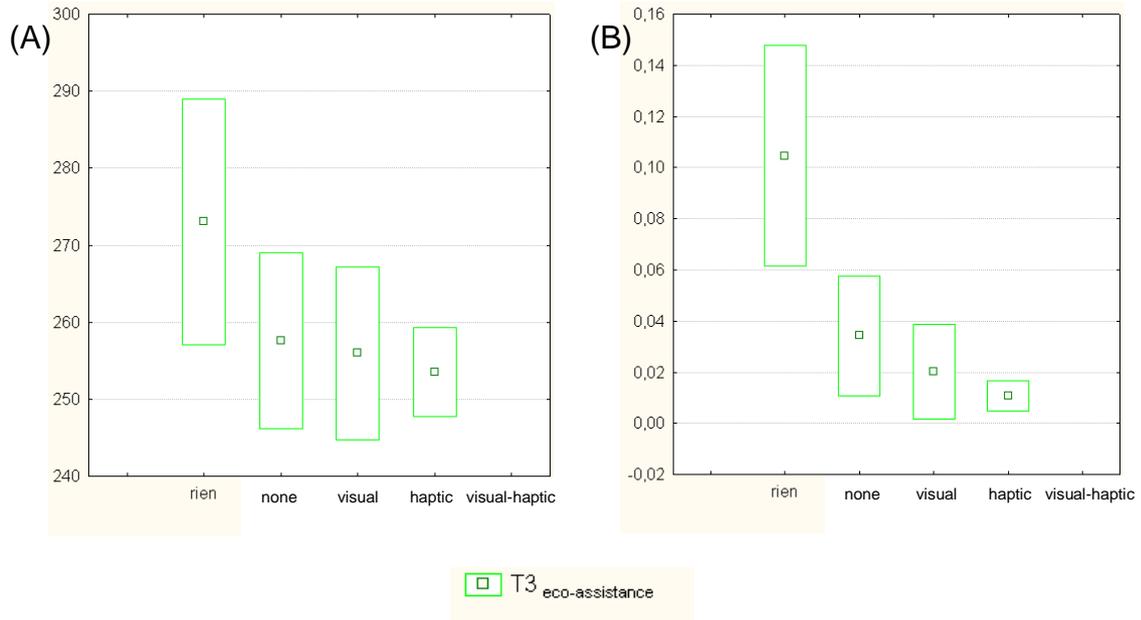


Fig 3: Plot by groups of total polluting emissions on T3_{eco-assistance} trial for (A) total polluting emissions and (B) mean of over-acceleration.

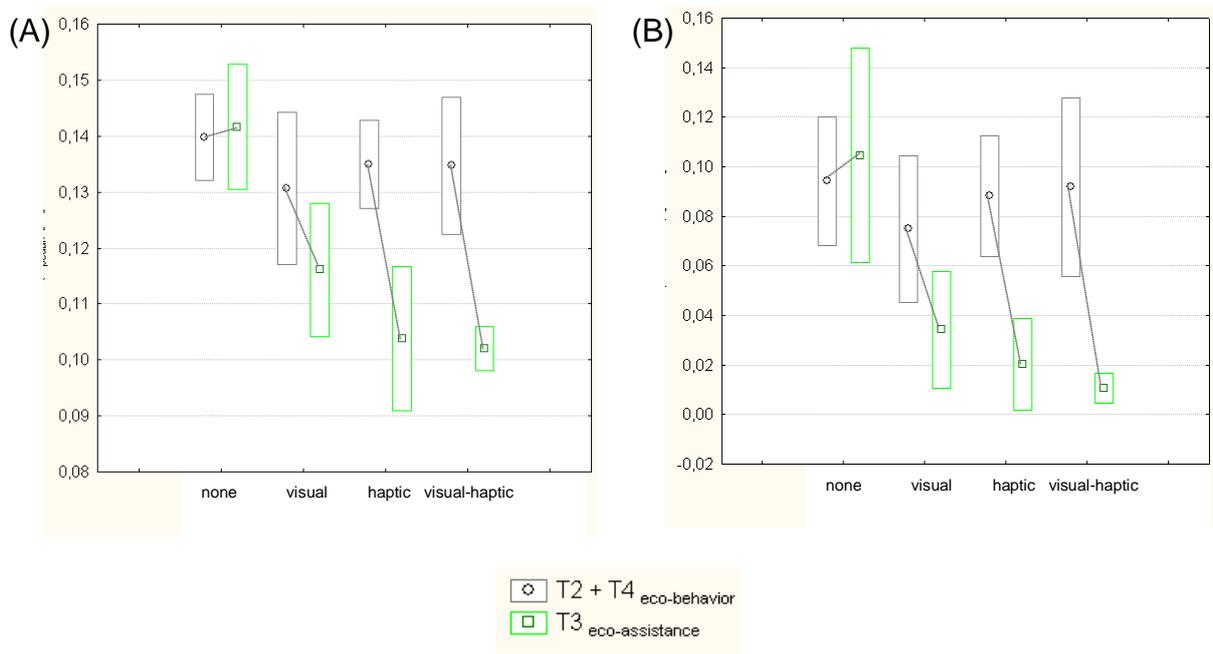


Fig 4: Plot of (A) standard deviation of pedal position; and (B) mean of over-acceleration, for verbally instructed trials and assisted trials for each group.

Discussion

This study is a first step to demonstrate the efficiency of a haptic feedback gas pedal on eco-driving, and the ability of drivers to adapt at first use of such an information feedback system. We choose to immerse drivers in a simulated driving context, without traffic to allow performance comparisons between experimental conditions. This choice may give preferential treatment to the visual assistance condition compared to ecological driving condition, because the visual perception of car traffic competes with the visual attention allocated to watching the visual assistance display.

Contribution of verbal instructions to eco-performance

In this experiment, adopting eco-driving behavior, by limiting engine speed at 2000 Rpm, constitutes a first significant step to reduce total polluting emissions by 5%, compared to driving sessions without instructions. Mean overpass of optimal acceleration, significantly decreases, suggesting that a correlation exists between our optimal acceleration model and eco-driving requirements.

Additional contribution generated by eco-driving assistances

The three assisted conditions provide significant decreases by 5 to 7% of total polluting emissions (see Fig 3 (A)). This result is consistent with the performance announced for the Continental's accelerator force feedback pedal, or the Nissan's eco pedal. However, there is no significant effect of the type of assistance feedback. This suggests that, haptic stimulation can be as efficient as visual stimulation, in terms of assisted eco-driving performance. Moreover, in presence of assistance feedback, drivers' over-acceleration level also significantly decrease (see Fig 3 (B)), suggesting that optimizing over-acceleration allows additional polluting emissions improvement, compared to engine speed optimization.

Drivers' reaction when first using the haptic pedal assistance

Even if haptic devices are newer than visual displays for eco-driving assistance, drivers show a good adaptation to haptic signal modulations. In the groups assisted haptically (haptic and visual-haptic conditions), we notice a significant decrease of the standard deviation of the accelerator pedal in assisted trials, compared to low engine speed verbally instructed trial, without active assistance. In the visual group, this decrease is not significant (see Fig 4 (A)). One could think that pedal stability is enhanced by opposing a counterforce to the foot, which helps guiding it to the position recommended by the system. This result shows a better efficiency of the force feedback pedal on foot stability, for a first usage of the haptic pedal system.

Drivers are able to make fast modifications of their foot admittance, depending on the specificity of the task they are performing. By measuring muscular activity of the leg pressing a car pedal, during "force tasks" (minimize effort variations) and "position task" (resist to perturbations), it

appears that drivers use antagonist muscles of the leg to accomplish the various use modes imposed by an active car pedal [Abbink & al, 2004]. In our “force task” experiment, the feedback stimulation provided by the haptic pedal was inhibitory [Mugge & al, 2009], since participants were asked to cancel additional force feedback when it appeared, by releasing accelerator pedal. This ability to modify the biomechanical admittance has also been highlighted for upper limbs with a steering wheel handling task. Drivers are able to control the trajectory of their car with different steering wheel force feedback strategies, whether they are linear or not, which implies a strong sensorimotor plasticity and a large capacity of quasi-instantaneous adaptation to haptic disturbances [Toffin & al, 2003]. We know furthermore, that the foot and the hand have the same degree of differentiation in haptic modality [Hajnal & al, 2007]. In spite of their neuronal and anatomic differences, the upper and lower limbs seem to have the same perceptive performance in terms of force discrimination ability.

Visual-haptic merging

When drivers have both visual and haptic assistance for a first use, the decrease in over-acceleration is significant. This decrease is also significant in haptic modality, but not with visual feedback (see Fig 4 (B)). Drivers show better self eco-performance improvement when, at least, haptic feedback is available, in comparison to visual assistance alone: this suggests that haptic is more suited for that particular double task (driving and following the eco-driving indications). This result is otherwise coherent with the higher reliance accorded by participants to the haptic modality, for instance in a visual-haptic size detection task [Ernst & al, 2002].

Conclusion

This study confirms the efficiency of basic eco-driving behaviors, like gear-shifting under 2000Rpm, on the generated polluting emissions for diesel engines. Adding eco-driving assistances (visual or haptic) allows additional reduction of polluting emissions, but no effect of the type of assistance feedback have been noticed in our experiment. With haptic and visual-haptic assistance, we also observe significant reductions of control activity, measured by standard deviation of gas pedal position, which demonstrates the ease of use of haptic feedback pedal for a first utilization of the system. Moreover, drivers apparently rely more on haptic modality when using both visual and haptic assistance. In this experiment, visual assistance may have an advantage in comparison to ecological driving conditions, because of lack of car traffic. Further studies should analyze the impact of car traffic on the efficiency of visual and haptic assistance, but also drivers’ adaptation to haptic feedback pedal in critical situations, when drivers need to accelerate, despite of the increased rigidity of the pedal.

Acknowledgements

Research supported by a CIFRE grant (ANRT N°601/2006). We thank A. Daumard (Renault, Energetic Unit) for experienced advices on car consumption models.

References

[Honda]

<http://automobiles.honda.com/insight-hybrid/fuel-efficiency.aspx>

Recarte, M., Nunes, L., (2003) Mental Workload While Driving: Effects on Visual Search, Discrimination, and Decision Making. *Journal of Experimental Psychology: Applied* 9, 119-137

Summala, H., Lamble, D., Laakso, M., (1998) Driving experience and perception of the lead car's braking when looking at in-car targets. *Accident Analysis and Prevention* 30, 401-407

[Continental]

http://www.contionline.com/generator/www/com/en/continental/pressportal/the_mes/press_releases/3_automotive_group/chassis_safety/press_releases/affp_2009_21_04_09_en,version=5.html

[Nissan]

http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2008/_STORY/080804-02-e.html

Várhelyi, A., Hjalmdahl, M., Hydén, C., Draskóczy, M., (2004) Effects of an active accelerator pedal on driver behaviour and traffic safety after long-term use in urban areas. *Accident Analysis & Prevention* 36, 729-737

Adell, E., Várhelyi, A., (2008) Driver comprehension and acceptance of the active accelerator pedal after long-term use. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 11, 37-51

Kuge, N., Boer, E., Yamamura, T., Ward, N., Manser, M., (2005) Study on driver's car following abilities based on an active haptic support function. *SAE transactions* 115, 157-169

Mulder, M., Mulder, M., van Paassen, M., Abbink, D., (2008) Haptic gas pedal feedback. *Ergonomics* 51, 1710-1720

Abbink, D., Van Der Helm, F., Boer, E., (2004) Admittance measurements of the foot during 'maintain position' and 'relax' tasks on a gas pedal. *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* 3, 2519-2524

Mugge, W., Abbink, D., Schouten, A., Dewald, J., van der Helm, F., (2009) A rigorous model of reflex function indicates that position and force feedback are flexibly tuned to position and force tasks. *Experimental Brain Research* 200, Numbers 3-4, 325-340

Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., (2003) Influence of Steering Wheel Torque Feedback in a Dynamic Driving Simulator. *Conference proceedings - Driving Simulation Conference North America*

Hajnal, A., Fonseca, S., Kinsella-Shaw, J., Silva, P., Carello, C., Turvey, M.T., (2007) Haptic selective attention by foot and by hand. *Neuroscience Letters* 419, 5-9

Ernst, M.O., Banks, M.S., (2002) Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature* 415, 429-433

ECO-DRIVING PERFORMANCE ASSESSMENT WITH IN-CAR VISUAL AND HAPTIC FEEDBACK ASSISTANCE

S. Azzi ^{1,2}, G. Reymond ¹, F. Mérienne ², A. Kemeny ^{1,2}

¹ RENAULT, Technical Centre for Simulation
1 Avenue du Golf – 78288 Guyancourt, France

² Arts et Métiers ParisTech, Le2i, CNRS, Institut Image
2 Rue Thomas Dumorey – 71100 Chalon sur Saône, France

Abstract

In this experiment, 28 participants completed an urban driving task in a highly immersive driving simulator at Renault's Technical Centre for Simulation. This simulator provides a 150° field of view in a fully instrumented cockpit. Two different eco-driving assistance devices were added: a visual display on the mid-console, and a force feedback system on the gas pedal, in order to apply an additional reaction torque on drivers' foot. The feedback information was computed by comparing the car's instant acceleration with an optimal acceleration level based on a proprietary consumption model of a Renault diesel engine.

This experiment has three main goals: I. Assess the contribution of verbal instructions to eco-driving performance; II. Quantify the additional contribution generated by two eco-driving assistance systems (visual and haptic); III. Measure drivers' acceptance of haptic eco-driving assistance system.

Basic eco-driving instructions, such as changing gears under 2000 Rpm, yield significant decrease of polluting emissions. Assisting drivers with visual, haptic, or visual-haptic on-board devices, in addition to low engine speed verbal instructions, lead to supplementary significant savings of polluting emissions. There is no significant difference between assistance feedback type; suggesting that haptic feedback provides the same eco-performance as visual feedback. In particular, subjects show good adaptation to the haptic feedback pedal at first utilization of the system. They apparently relied more on haptic modality to achieve the eco-driving task, when they used both visual and haptic assistance.

Introduction

Context

Since the early seventies, the European Union has been controlling the polluting emissions of its vehicles by setting more and more drastic ecologic standards [1]. From the early nineties, the development of the collective consciousness for ecology, associated to continuous fuel price increase urges countries to set up sustainable development plans for their vehicle market. In addition to the rules fixed to carmakers, actions have been led to sensitize car holders to eco-driving practicing. In particular, recently, eco-driving has been largely promoted by public organizations. Another way to provide help in eco-driving is to use an on-board assistance system with information on driving eco-efficiency. Feedback may be carried through various sensory modalities: visual, auditory or haptic.

Visual assistance feedback

Nowadays, most of the cars are equipped with a digital information display of instant consumption. In order to enhance the visual salience of its consumption display system, Honda has developed in 2009 a speedometer with changing colors, depending on drivers' eco-performance [2]. Car simulators provide an effective mean to study the impact of such visual information systems on driving attention and performance [3, 4]. However, drivers' visual attention is mainly focused on the road. By submitting driving participants to other visual on-board detection tasks, it is suggested that visual stimulus detection performance deteriorates [5]. Moreover, lane keeping and distance keeping to followed car, with the help of peripheral vision, appears to be impaired when watching a visual display on the speedometer. This impairment grows when the display is on the mid-console [6]. A quantitative performance assessment of the display indicates that vertical eccentricity compared to the line of sight of the road has a greater detrimental effect than horizontal distance [7].

Haptic assistance feedback

Haptic stimulation through gas pedal is another way to provide feedback information on eco-performance. One of the strengths of the human haptic system, as compared to the visual system, is the fast information transmission to the brain [8]. Continental has developed an accelerator force feedback pedal AFFP[®] [9], which vibrates to inform drivers on optimal gear-shifting instant. Nissan proposes since 2009 an ECO Pedal[®] [10] to provide force feedback information on optimal pedal position, depending on engine state. Both announce fuel savings of between 5 and 10%. Haptic feedback pedal has already been studied in long-term and large field studies for speed limitation requirements. In this particular application, haptic appears to be more efficient than visual assistance. Significant decreases of mean and variation of speed, as well as polluting emissions are observed [11]. Haptic

feedback pedal acceptance is positively rated by drivers, but they do not show enough willingness to use it daily, nor to pay for it [12].

In car following applications, haptic feedback pedal systems give information on inter-vehicular distance by modifying the gas pedal stiffness proportionally to the distance separating subject to forward car. This system allows significant decrease of standard deviation of inter-vehicle distance and braking reaction time [13, 14]. It also induces an increase of visual detection performance by reducing driver's workload, in particular because subjects apparently apply a basic strategy of maintaining a constant effort against the gas pedal when driving [15].

Objectives

In this study, we aim at evaluating the efficiency of basic eco-driving instructions for polluting emissions reduction. We also try to assess and compare the additional improvements brought by the visual, haptic and coupled visual-haptic eco-driving assistances. Finally, we test whether drivers feel at ease at a first use of the force feedback pedal, which intuitively could appear as very intrusive in the control of the car.

Method

Experimental device

This experiment has been conducted on the dynamic driving simulator CARDS [16] at the Technical Center for Simulation of Renault. This simulator, is composed of a modular cockpit, completely instrumented, providing to the driver all the equipments and interactions existing in a real car. It is based on the SCANer2© [17] simulation software package, developed by Renault, which is a real-time distributed application, providing a large set of functionalities for driving research fields. The front view is provided by 3 projectors delivering a 150° horizontal field of view image. The visual absolute validity of the simulator is enhanced by our large field of view, which allows a correct estimation of longitudinal speed by visual cues [18].

For experimental needs, the simulator has been enriched with two eco-driving assistance devices: a visual interface positioned on top of the central console provides visual information on $F_{additional}$ value through a progress bar; and a gas pedal coupled with an actuator stimulates haptically driver's foot by superposing $F_{additional}$ to the initial pedal torque. These two devices provide exactly the same information to drivers through different modalities.

A Renault proprietary eco-driving model (Fig 1) compares in real time the longitudinal acceleration of the drive vehicle Acc_{veh} to an optimal acceleration level, depending on car speed Acc_{opt} . This model does not take in account the engine revolution speed. When the drivers' acceleration is over the optimal value, a normalized counter-acting force $F_{additional}$, proportional to the gas pedal position X_{pedal} , is opposed to drivers' foot (Fig 1). Gas pedal force was equal to 35N when Acc_{veh} reached twice Acc_{opt} .

$F_{additional}$ is calculated as follow:

Acc_veh = Vehicle acceleration
 Acc_opt = Optimal acceleration
 ΔAcc = Over-acceleration based on our model
 X_{pedal} = Pedal position

$\Delta Acc = Acc_{veh} - Acc_{opt}$
 $F_{additional} = K \cdot X_{pedal} \cdot (\Delta Acc / Acc_{opt})$
 With K = Pedal stiffness factor

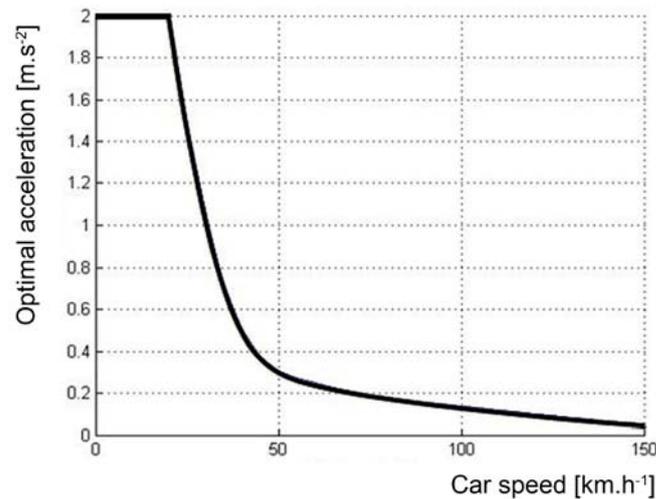


Fig 1: Principle of Renault eco-driving model.

Protocol

Task description

The experimental task consists in driving through an urban environment, along a predefined route. No car traffic is present, to facilitate control task repeatability and compare more efficiently eco-driving performances between experimental conditions.



Fig 2: Picture of the CARDS simulator, with mid-console assistance display.

Participants

28 subjects aged between 25 and 45 took part in the experiment (7 females and 21 males). All drivers were in possession of a valid driving license. Participants were split into 4 distinct groups of 7 subjects. Three groups were given assistance feedback at third trial: the visual group (S_v) had a visual assistance display; the haptic group (S_h), was assisted with the haptic pedal; and the visual-haptic group (S_{vh}), had both visual and haptic assistance. The fourth group is the reference group (S_n), no assistance was provided, and drivers had to accomplish the verbally instructed condition.

Conditions

Initially, participants had to follow a training session, during which, drivers were asked to accomplish two practice runs in order to get used to drive comfortably with the CARDS simulator and to memorize the experimental task path. Participants in assisted groups drove 1 minute more to understand the functioning of the assistance system to use. After practicing, all participants confirmed that they felt at ease with the whole experimental device.

Participants drove the same route four times in different conditions:

- ($T1_{ref}$) Normal driving without instructions nor assistance
- ($T2_{eco-behavior}$) Driving with the verbal instruction not to exceed 2000 Rpm
- ($T3_{eco-assistance}$) Same as condition 2 with the support of an assistance feedback
- ($T4_{eco-behavior}$) A repetition of trial (T2)

Data recordings

The following objective data was recorded for each subject:

- Total polluting emissions, calculated on the base of a Renault proprietary model of fuel consumption of a Megane diesel car.
- $Std(X_{pedal})$, the standard deviation of gas pedal position, calculated on the whole trajectory for each run.
- $Mean(\Delta Acc)$, the mean of over-acceleration, resulting from the difference between Acc_{veh} , the instantaneous longitudinal acceleration of the car, and Acc_{opt} , the optimal acceleration depending on car speed, given by the Renault proprietary eco-driving rule.

Results

We performed an ANOVA planned comparison with $\alpha = 0,05$ on these parameters (Table).

A comparison between $T1_{ref}$ and $T2_{eco-behavior}$ was computed among all subjects. A significant decrease was observed on our parameters of interest.

A between group comparison on assisted trial $T3_{eco-assistance}$ was computed, to evaluate the benefit of each assistance, compared to the reference unassisted group (S_n), with verbal instruction to drive at low engine speed. Assistance systems induced a significant decrease. However, there were no significant effects of the type of assistance feedback.

By comparing, into each assisted group, verbally instructed runs (mean of $T2_{eco-behavior}$ and $T4_{eco-behavior}$) to assisted runs $T3_{eco-assistance}$ ($T2$ and $T4$ serves to cancel the bias due to learning effects of low engine speed driving across the three last trials), visual assistance does not lead to significant improvements for any of the parameters of interest. In the haptically assisted group, total polluting emissions is the only result which is not significantly improved. In visual-haptic group, all the recorded parameters are significantly reduced.

	Total polluting emissions	Std (X_{pedal})	Mean (ΔAcc)
All subjects ($T1_{ref}$ VS $T2_{eco-behavior}$)	F(1.88)= 19,87; p<0.001	F(1.88)= 25,85; p<0.001	F(1.88)= 23,15; p<0.001
S_v group ($T2 + T4$ vs $T3$)	NS	NS	NS
S_h group ($T2 + T4$ vs $T3$)	NS	F(1.88)= 12,84; p<0.001	F(1.88)= 6,62; p<0.05
S_{vh} group ($T2 + T4$ vs $T3$)	F(1.88)= 4,32; p<0.05	F(1.88)= 14,23; p<0.001	F(1.88)= 9,38; p<0.005
$T3_{eco-assistance}$ trials (S_n vs S_v)	F(1.88)= 4,69; p<0.05	F(1.88)= 5,45; p<0.05	F(1.88)= 4,42; p<0.05
$T3_{eco-assistance}$ trials (S_n vs S_h)	F(1.88)= 5,74; p<0.05	F(1.88)= 5,68; p<0.05	F(1.88)= 6,35; p<0.05
$T3_{eco-assistance}$ trials (S_n vs S_{vh})	F(1.88)= 7,51; p<0.01	F(1.88)= 7,55; p<0.01	F(1.88)= 7,86; p<0.005

Table: Results of the ANOVA planned comparison analysis

Discussion

This study is a first step to demonstrate the efficiency of a haptic feedback gas pedal on eco-driving, and the ability of drivers to adapt at first use of such an information feedback system. We chose to immerse drivers in a simulated driving context, without traffic to allow performance comparisons between experimental conditions. This choice may give preferential treatment to the visual assistance condition compared to ecological driving condition,

because the visual perception of car traffic competes with the visual attention allocated to watching the visual assistance display.

Contribution of verbal instructions to eco-performance

In this experiment, adopting eco-driving behavior, by limiting engine speed at 2000 Rpm, constitutes a first significant step to reduce total polluting emissions by 5%, compared to driving sessions without instructions (Fig 3-A). Mean overpass of optimal acceleration, significantly decreases (Fig 3-B), suggesting that a correlation exists between our optimal acceleration model and eco-driving requirements.

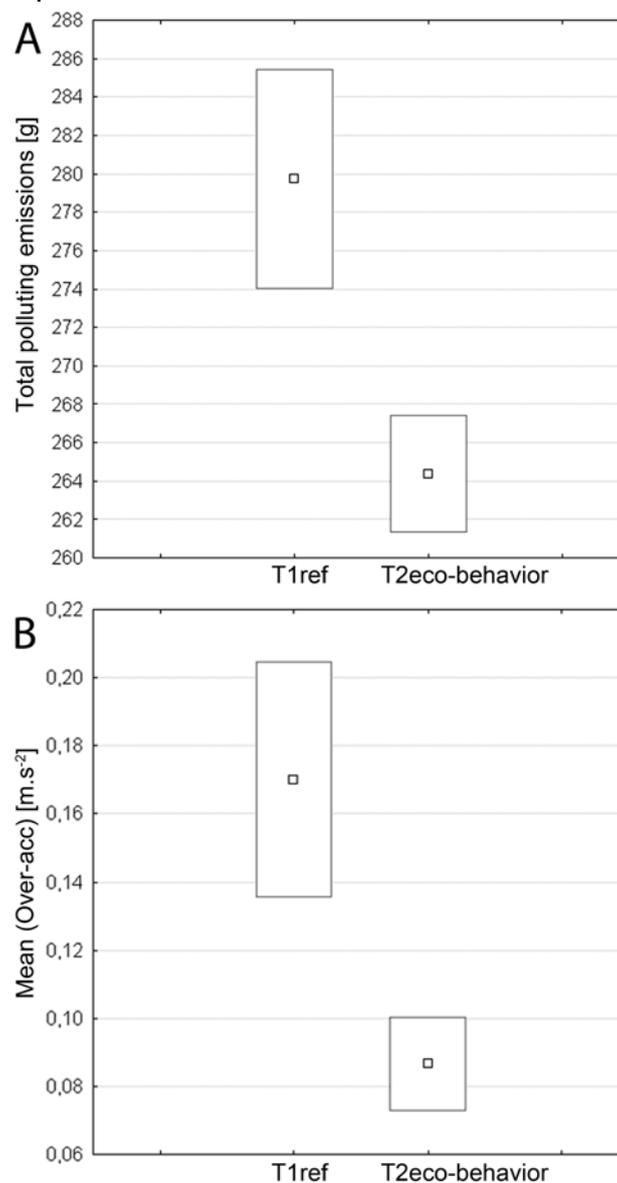


Fig 3: Plot by trials, among all subjects, of total polluting emissions (A); and mean over-acceleration compared to optimal (B).

Additional contribution generated by eco-driving assistances

The three assisted conditions provide significant decreases by 5 to 7% of total polluting emissions, in addition to the decrease observed when following verbal instructions to drive at low engine speed (Fig 4-A). This result is consistent with the performance announced for the Continental's accelerator force feedback pedal [9], or the Nissan's eco pedal [10]. However, there is no significant effect of the type of assistance feedback. This suggests that, haptic stimulation can be as efficient as visual stimulation, in terms of assisted eco-driving performance. Moreover, in presence of assistance feedback, drivers' over-acceleration level also significantly decrease (Fig 4-B), suggesting that optimizing over-acceleration allows additional polluting emissions improvement, compared to engine speed optimization.

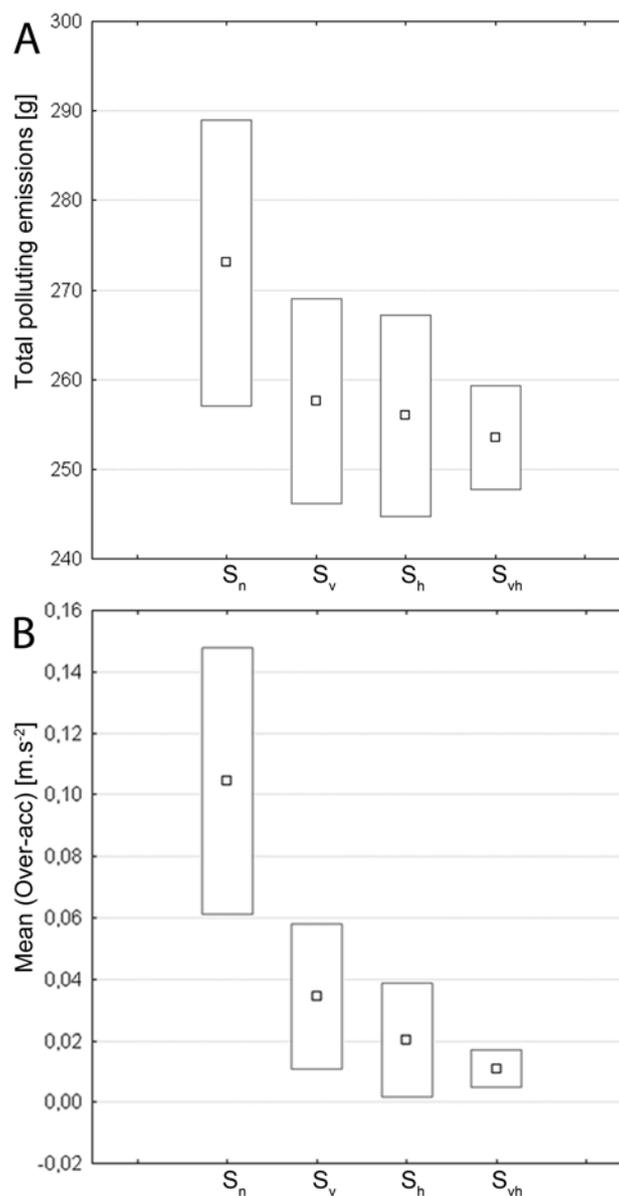


Fig 4: Plot by groups of $T3_{eco-assistance}$ trials for total polluting emissions (A); and mean of over-acceleration (B).

Drivers' reaction when first using the haptic pedal assistance

Even if haptic devices are newer than visual displays for eco-driving assistance, drivers show a good adaptation to haptic signal modulations. In the groups assisted haptically (haptic and visual-haptic conditions), we notice a significant decrease of the standard deviation of the accelerator pedal position, in assisted trials, compared to low engine speed verbally instructed trial, without active assistance. In the visual group, this decrease is not significant (Fig 5-A). One could think that pedal stability is enhanced by opposing a counterforce to the foot, which helps guiding it to the position recommended by the system. This result shows a better efficiency of the force feedback pedal on foot stability, for a first usage of the haptic pedal system.

Drivers are able to make fast modifications of their foot response, depending on the specificity of the task they are performing. By measuring muscular activity of the leg pressing a car pedal, during "force tasks" (minimize effort variations) and "position task" (resist to perturbations), it appears that drivers use antagonist muscles of the leg to accomplish the various use modes imposed by an active car pedal [19]. In our "force task" experiment, the feedback stimulation provided by the haptic pedal was inhibitory [20], since participants were asked to cancel additional force feedback when it appeared, by releasing accelerator pedal.

This ability to modify the biomechanical admittance has also been highlighted for upper limbs with a steering wheel handling task. Drivers are able to control the trajectory of their car with different steering wheel force feedback strategies, whether they are linear or not, which implies a strong sensorimotor plasticity and a large capacity of quasi-instantaneous adaptation to haptic disturbances [21]. We know furthermore, that the foot and the hand have the same degree of differentiation in haptic modality [22]. In spite of their neuronal and anatomic differences, the upper and lower limbs seem to have the same perceptive performance in terms of force discrimination ability. This ability allows fast detections of force feedback variations perceived by drivers' foot and thus induces fast response to this haptic stimulation by releasing gas pedal. This property of haptic perception could explain the good results in terms of over-acceleration minimization in presence of haptic assistance pedal.

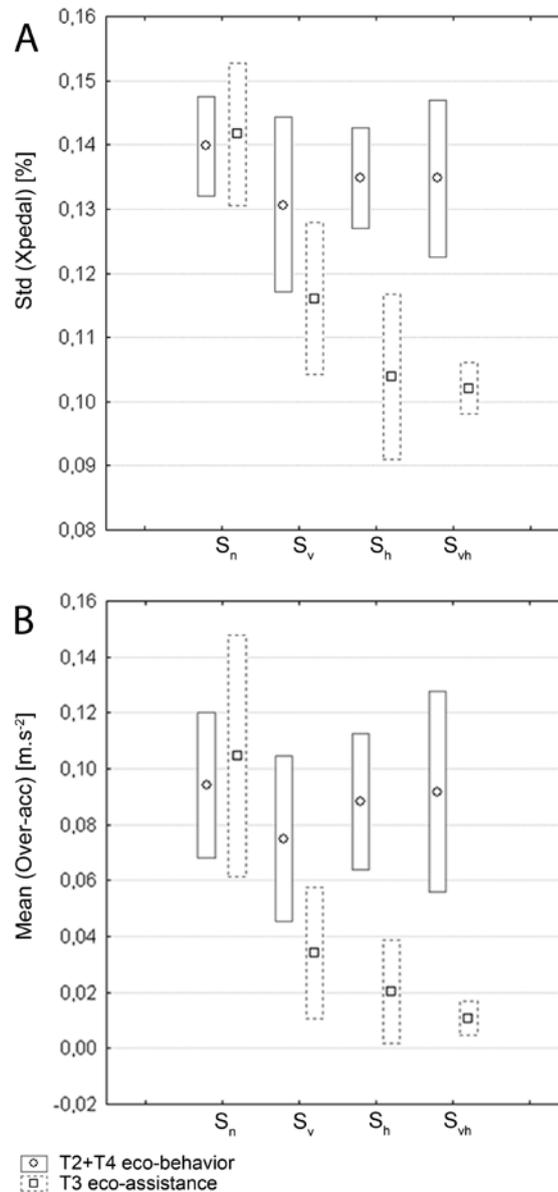


Fig 5: Plot of verbally instructed trials and assisted trials for each group for standard deviation of pedal position (A); and mean of over-acceleration(B).

Visual-haptic merging

When drivers have both visual and haptic assistance for a first use, the decrease in over-acceleration is significant. This decrease is also significant in haptic modality, but not with visual feedback (Fig 5-B). Drivers show better self eco-performance improvement when, at least, haptic feedback is available, in comparison to visual assistance alone: this suggests that haptic is more suited for that particular double task (driving and following the eco-driving indications). This result is otherwise coherent with the higher reliance accorded by participants to the haptic modality when visual perception is impaired, for instance in a visual-haptic size detection task [23, 24]. In our

study, this impairment on the reliability of visual assistance perception could be a consequence of the competitive visual workload induced by the driving task. In that case, visual perception performance tends to decrease when car traffic complexity increases, since a reduction of the performance in driver's visual detection and discrimination is observed [25]. As well, one could assume that increasing number of curves on the track could lower visual perception ability.

Conclusion

This study confirms the efficiency of basic eco-driving behaviors, like gear-shifting under 2000Rpm, on the amount of generated polluting emissions for diesel engines. Adding eco-driving assistances (visual or haptic) allows additional reduction of polluting emissions, but no effect of the type of assistance feedback have been noticed in our experiment. With haptic and visual-haptic assistance, we also observe significant reductions of control activity, measured by standard deviation of gas pedal position, which demonstrates the ease of use of haptic feedback pedal for a first utilization of the system. Moreover, drivers apparently rely more on haptic modality when using both visual and haptic assistance. In this experiment, visual assistance may have an advantage in comparison to ecological driving conditions, because of the lack of car traffic. Further studies should analyze the impact of the curviness of the road, as well as the impact of car traffic complexity on the efficiency of visual and haptic assistance, but also drivers' adaptation to haptic feedback pedal in critical situations, when drivers need to accelerate, despite of the increased rigidity of the pedal.

Acknowledgements

Research supported by a CIFRE grant (ANRT N°601/2006). We thank A. Daumard (Renault, Energetic Unit) for experienced advice on car consumption models.

References

- [1]http://europa.eu/legislation_summaries/transport/transport_energy_environment/index_en.htm
- [2]<http://automobiles.honda.com/insight-hybrid/fuel-efficiency.aspx>
- [3] Reimer, B., D'Ambrosio, L., Coughlin, J., Kafrissen, M., Biederman, J., 2006, "Using self-reported data to assess the validity of driving simulation data", *Behavior Research Methods*, vol. 38, Mai. 2006, pp. 314-324
- [4] Wang, Y., Mehler, B., Reimer, B., Lammers, V., D'Ambrosio, L., Coughlin, J., 2010, "The validity of driving simulation for assessing differences between in-vehicle informational interfaces: A comparison with field testing", *Ergonomics*, vol. 53, pp. 404
- [5] Recarte, M., Nunes, L., 2003, "Mental Workload While Driving: Effects on Visual Search, Discrimination, and Decision Making". *Journal of Experimental Psychology: Applied* 9, pp. 119-137
- [6] Summala, H., Lamble, D., Laakso, M., 1998, "Driving experience and perception of the lead car's braking when looking at in-car targets" *Accident Analysis and Prevention* 30, pp. 401-407
- [7] Wittmann, M., Kiss, M., Gugg, P., Steffen, A., Fink, M., Pöppel, E., Kamiya, H., 2006, "Effects of display position of a visual in-vehicle task on simulated driving" *Applied Ergonomics*, vol. 37, Mar. 2006, pp. 187-199.
- [8] Harrar, V., Harris, L., 2005, "Simultaneity constancy: detecting events with touch and vision" *Experimental Brain Research*, vol. 166, 2005, pp. 465-473
- [9]http://www.conti-online.com/generator/www/com/en/continental/pressportal/themes/press_releases/3_automotive_group/chassis_safety/press_releases/pr_2010_02_23_affp_hmi_en.html
- [10]http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2008/_STORY/080804-02-e.html
- [11] Várhelyi, A., Hjälm Dahl, M., Hydén, C., Draskóczy, M., 2004, "Effects of an active accelerator pedal on driver behaviour and traffic safety after long-term use in urban areas" *Accident Analysis & Prevention* 36, pp. 729-737
- [12] Adell, E., Várhelyi, A., 2008, "Driver comprehension and acceptance of the active accelerator pedal after long-term use" *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 11, pp. 37-51
- [13] Kuge, N., Boer, E., Yamamura, T., Ward, N., Manser, M., 2005, "Study on driver's car following abilities based on an active haptic support function" *SAE transactions* 115, pp. 157-169

- [14] Mulder, M., Mulder, M., Van Paassen, M., Abbink, D., 2008, "Haptic gas pedal feedback" *Ergonomics* 51, pp. 1710-1720
- [15] Mulder, M., Mulder, M., Van Paassen, M., Kitazaki, S., Hijikata, S., Boer, E., 2004 "Car-following support with haptic gas pedal feedback" *Proceedings of IFAC symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, Atlanta, GA, USA, pp. 117-123
- [16] Reymond, G., Kemeny, A., 2000, "Motion cueing in the Renault driving simulator" *Vehicle System Dynamics* 34, pp. 249-259
- [17]<http://www.scanersimulation.com/en.html>
- [18] Kemeny, A., Panerai, F., 2003, "Evaluating perception in driving simulation experiments" *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 7, Jan. 2003, pp. 31-37.
- [19] Abbink, D., Van Der Helm, F., Boer, E., 2004, "Admittance measurements of the foot during 'maintain position' and 'relax' tasks on a gas pedal" *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* 3, pp. 2519-2524
- [20] Mugge, W., Abbink, D., Schouten, A., Dewald, J., van der Helm, F., 2009, "A rigorous model of reflex function indicates that position and force feedback are flexibly tuned to position and force tasks" *Experimental Brain Research* 200, Numbers 3-4, pp. 325-340
- [21] Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., 2003, "Influence of Steering Wheel Torque Feedback in a Dynamic Driving Simulator" *Conference proceedings - Driving Simulation Conference North America*
- [22] Hajnal, A., Fonseca, S., Kinsella-Shaw, J., Silva, P., Carello, C., Turvey, M.T., 2007, "Haptic selective attention by foot and by hand" *Neuroscience Letters* 419, pp. 5-9
- [23] Ernst, M.O., Banks, M.S., 2002, "Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion" *Nature* 415, pp. 429-433
- [24] Gepshtein, S., Banks, M., 2003, "Viewing Geometry Determines How Vision and Haptics Combine in Size Perception" *Current Biology*, vol. 13, 2003, pp. 483-488
- [25] Nunes, L., Recarte, M., 2005, "Speed, traffic complexity and visual performance: a study on open road" *Traffic and Transport Psychology. Theory and Application: Proceedings of the ICTTP 2004*, pp. 339-354

Annexes – Résultats bruts

Expérimentation éco-conduite

Données calculées pour chaque essai

groupe	sujet	essai	moy couple	std pos pedale	std vitesse pedale	std acc	consommation	moy suraccél	accumul suraccél	suraccél /s
Sn	a	T1ref	0,243	0,186	0,349	1,231	268,559	0,177	29,865	0,177
Sn	a	T2rpm	0,129	0,141	0,363	0,878	252,848	0,081	14,457	0,081
Sn	a	T3assist	0,151	0,136	0,350	1,039	266,286	0,090	15,972	0,090
Sn	a	T4rpm	0,127	0,132	0,337	0,887	250,838	0,078	13,532	0,078
Sn	b	T1ref	0,270	0,172	0,318	1,441	283,426	0,186	34,131	0,186
Sn	b	T2rpm	0,148	0,151	0,318	1,229	267,902	0,095	16,932	0,095
Sn	b	T3assist	0,132	0,140	0,314	1,202	265,083	0,091	16,369	0,091
Sn	b	T4rpm	0,163	0,137	0,314	1,165	266,677	0,101	17,671	0,101
Sn	c	T1ref	0,298	0,167	0,336	1,240	277,277	0,178	30,243	0,178
Sn	c	T2rpm	0,083	0,126	0,364	0,841	254,414	0,061	12,718	0,061
Sn	c	T3assist	0,083	0,131	0,355	0,948	261,873	0,061	12,893	0,061
Sn	c	T4rpm	0,051	0,127	0,361	0,927	264,994	0,042	9,389	0,042
Sn	d	T1ref	0,356	0,184	0,290	1,416	283,926	0,227	36,705	0,227
Sn	d	T2rpm	0,207	0,149	0,301	1,316	279,419	0,143	24,957	0,143
Sn	d	T3assist	0,212	0,149	0,310	1,255	279,154	0,144	24,969	0,144
Sn	d	T4rpm	0,221	0,156	0,323	1,251	276,967	0,154	26,976	0,154
Sn	e	T1ref	0,316	0,179	0,219	1,468	287,632	0,227	38,309	0,227
Sn	e	T2rpm	0,073	0,130	0,254	1,037	257,632	0,065	12,583	0,065
Sn	e	T3assist	0,228	0,152	0,260	1,297	292,732	0,137	25,760	0,137
Sn	e	T4rpm	0,197	0,148	0,285	1,213	280,792	0,121	21,922	0,121
Sv	a	T1ref	0,066	0,124	0,237	1,168	271,771	0,047	9,592	0,047
Sv	a	T2rpm	0,001	0,095	0,219	0,814	253,029	0,001	0,183	0,001
Sv	a	T3assist	0,001	0,097	0,229	0,705	248,399	0,001	0,194	0,001
Sv	a	T4rpm	0,001	0,092	0,208	0,765	251,401	0,001	0,291	0,001
Sv	b	T1ref	0,443	0,233	0,324	1,819	328,768	0,404	61,514	0,404
Sv	b	T2rpm	0,180	0,144	0,341	1,204	269,995	0,118	21,222	0,118
Sv	b	T3assist	0,078	0,128	0,317	1,041	259,942	0,079	14,008	0,079
Sv	b	T4rpm	0,253	0,150	0,326	1,188	272,098	0,140	23,844	0,140
Sv	c	T1ref	0,173	0,166	0,296	1,288	279,013	0,167	29,608	0,167
Sv	c	T2rpm	0,082	0,140	0,321	1,057	257,833	0,088	16,591	0,088
Sv	c	T3assist	0,008	0,111	0,276	0,801	278,863	0,016	3,189	0,016
Sv	c	T4rpm	0,040	0,108	0,245	0,954	253,958	0,036	6,834	0,036
Sv	d	T1ref	0,320	0,190	0,314	1,390	282,419	0,219	36,113	0,219
Sv	d	T2rpm	0,209	0,150	0,298	1,322	278,579	0,146	25,965	0,146
Sv	d	T3assist	0,033	0,121	0,301	1,138	268,205	0,042	8,171	0,042
Sv	d	T4rpm	0,165	0,140	0,313	1,280	279,520	0,108	19,772	0,108
Sv	e	T1ref	0,365	0,177	0,232	1,425	292,930	0,208	35,257	0,208
Sv	e	T2rpm	0,217	0,155	0,207	1,227	282,670	0,101	18,261	0,102
Sv	e	T3assist	0,017	0,104	0,183	0,927	254,808	0,025	5,056	0,025
Sv	e	T4rpm	0,046	0,105	0,211	0,990	258,753	0,039	8,087	0,039

Sv	f	T1ref	0,213	0,183	0,234	1,223	270,260	0,170	31,168	0,170
Sv	f	T2rpm	0,181	0,162	0,216	1,131	257,824	0,134	24,296	0,134
Sv	f	T3assist	0,031	0,121	0,193	0,914	249,185	0,050	9,987	0,050
Sv	f	T4rpm	0,089	0,126	0,225	0,946	253,174	0,067	12,976	0,067
Sv	g	T1ref	0,117	0,148	0,265	1,140	261,007	0,084	17,871	0,084
Sv	g	T2rpm	0,064	0,147	0,274	0,817	245,321	0,048	10,477	0,048
Sv	g	T3assist	0,023	0,131	0,252	0,796	243,826	0,027	5,637	0,027
Sv	g	T4rpm	0,025	0,114	0,254	0,785	244,608	0,020	4,258	0,020
Sh	a	T1ref	0,056	0,127	0,272	1,028	257,299	0,048	9,679	0,048
Sh	a	T2rpm	0,044	0,125	0,284	0,907	251,118	0,042	9,073	0,042
Sh	a	T3assist	0,002	0,108	0,275	0,817	248,643	0,010	2,098	0,010
Sh	a	T4rpm	0,014	0,116	0,265	0,833	248,124	0,020	4,190	0,020
Sh	b	T1ref	0,324	0,165	0,265	1,208	281,160	0,181	29,638	0,181
Sh	b	T2rpm	0,116	0,123	0,215	0,891	258,315	0,073	13,652	0,073
Sh	b	T3assist	0,001	0,085	0,167	0,668	243,450	0,004	0,719	0,004
Sh	b	T4rpm	0,096	0,118	0,225	0,868	256,161	0,060	11,076	0,060
Sh	c	T1ref	0,256	0,163	0,229	1,402	287,810	0,197	33,590	0,197
Sh	c	T2rpm	0,207	0,142	0,247	1,272	279,521	0,127	22,518	0,127
Sh	c	T3assist	0,044	0,119	0,223	1,091	271,080	0,037	6,986	0,037
Sh	c	T4rpm	0,218	0,149	0,242	1,262	283,770	0,140	24,910	0,140
Sh	d	T1ref	0,235	0,160	0,334	1,294	275,195	0,171	29,228	0,171
Sh	d	T2rpm	0,231	0,159	0,353	1,256	275,498	0,148	26,119	0,148
Sh	d	T3assist	0,011	0,113	0,267	1,093	269,623	0,012	2,471	0,012
Sh	d	T4rpm	0,204	0,150	0,297	1,301	287,765	0,127	24,620	0,127
Sh	e	T1ref	0,180	0,145	0,204	1,161	270,841	0,099	17,429	0,099
Sh	e	T2rpm	0,076	0,128	0,145	1,061	261,631	0,060	11,847	0,060
Sh	e	T3assist	0,006	0,092	0,109	0,719	245,946	0,014	2,749	0,014
Sh	e	T4rpm	0,191	0,151	0,164	1,208	265,036	0,141	24,236	0,141
Sh	f	T1ref	0,163	0,147	0,277	1,052	279,807	0,082	15,953	0,082
Sh	f	T2rpm	0,131	0,131	0,283	1,137	269,247	0,073	13,488	0,073
Sh	f	T3assist	0,003	0,093	0,268	0,806	247,837	0,007	1,455	0,007
Sh	f	T4rpm	0,080	0,123	0,281	0,966	258,180	0,049	9,405	0,048
Sh	g	T1ref	0,205	0,157	0,238	1,271	275,180	0,142	25,801	0,142
Sh	g	T2rpm	0,147	0,141	0,276	1,171	263,832	0,109	20,878	0,109
Sh	g	T3assist	0,040	0,118	0,264	1,147	265,194	0,058	11,721	0,058
Sh	g	T4rpm	0,090	0,133	0,259	1,143	265,504	0,068	13,944	0,068
Svh	a	T1ref	0,142	0,135	0,295	1,266	274,900	0,089	16,249	0,089
Svh	a	T2rpm	0,091	0,128	0,312	1,030	259,900	0,061	11,218	0,061
Svh	a	T3assist	0,008	0,109	0,289	0,929	257,078	0,013	2,613	0,013
Svh	a	T4rpm	0,085	0,120	0,295	1,126	269,513	0,052	9,796	0,052
Svh	b	T1ref	0,351	0,166	0,224	1,159	276,190	0,207	31,639	0,207
Svh	b	T2rpm	0,196	0,141	0,209	1,151	265,684	0,132	22,477	0,132
Svh	b	T3assist	0,005	0,099	0,192	0,834	247,962	0,012	2,226	0,012
Svh	b	T4rpm	0,185	0,133	0,197	1,138	264,733	0,120	20,137	0,121
Svh	c	T1ref	0,314	0,156	0,256	1,321	279,118	0,167	27,169	0,167
Svh	c	T2rpm	0,114	0,151	0,247	1,149	264,197	0,097	17,988	0,097
Svh	c	T3assist	0,001	0,099	0,240	0,760	249,251	0,004	0,811	0,004
Svh	c	T4rpm	0,003	0,104	0,250	0,845	251,203	0,003	0,572	0,003
Svh	d	T1ref	0,490	0,221	0,351	1,637	305,974	0,361	56,148	0,361
Svh	d	T2rpm	0,316	0,180	0,347	1,428	280,602	0,225	36,669	0,225
Svh	d	T3assist	0,006	0,106	0,263	1,010	259,253	0,013	2,548	0,013
Svh	d	T4rpm	0,240	0,155	0,316	1,221	273,413	0,148	24,862	0,148

Svh	e	T1ref	0,345	0,176	0,291	1,322	284,173	0,212	35,198	0,212
Svh	e	T2rpm	0,251	0,155	0,287	1,240	270,199	0,155	26,902	0,155
Svh	e	T3assist	0,004	0,103	0,294	0,960	259,007	0,008	1,534	0,008
Svh	e	T4rpm	0,157	0,138	0,328	1,184	266,703	0,089	16,302	0,089
Svh	f	T1ref	0,070	0,124	0,229	1,093	272,813	0,043	9,226	0,043
Svh	f	T2rpm	0,044	0,116	0,251	0,838	264,254	0,023	5,208	0,023
Svh	f	T3assist	0,003	0,097	0,222	0,813	257,941	0,003	0,795	0,003
Svh	f	T4rpm	0,005	0,102	0,231	0,856	257,529	0,004	0,897	0,004
Svh	g	T1ref	0,197	0,157	0,255	1,213	265,906	0,132	23,087	0,132
Svh	g	T2rpm	0,098	0,127	0,199	0,993	261,831	0,079	14,437	0,079
Svh	g	T3assist	0,007	0,101	0,172	0,774	244,128	0,022	4,188	0,022
Svh	g	T4rpm	0,136	0,135	0,212	1,084	263,286	0,098	16,921	0,098

Significativité des comparaisons planifiées pour chaque paramètre

	Total polluting emissions	Std (X_{pedal})	Mean (ΔAcc)
All subjects (T1 _{ref} vs T2 _{eco-behavior})	F(1.88)= 19,87; p<0.001	F(1.88)= 25,85; p<0.001	F(1.88)= 23,15; p<0.001
S _v group (T2 + T4 vs T3)	NS	NS	NS
S _h group (T2 + T4 vs T3)	NS	F(1.88)= 12,84; p<0.001	F(1.88)= 6,62; p<0.05
S _{vh} group (T2 + T4 vs T3)	F(1.88)= 4,32; p<0.05	F(1.88)= 14,23; p<0.001	F(1.88)= 9,38; p<0.005
T3 _{eco-assistance} trials (S _n vs S _v)	F(1.88)= 4,69; p<0.05	F(1.88)= 5,45; p<0.05	F(1.88)= 4,42; p<0.05
T3 _{eco-assistance} trials (S _n vs S _h)	F(1.88)= 5,74; p<0.05	F(1.88)= 5,68; p<0.05	F(1.88)= 6,35; p<0.05
T3 _{eco-assistance} trials (S _n vs S _{vh})	F(1.88)= 7,51; p<0.01	F(1.88)= 7,55; p<0.01	F(1.88)= 7,86; p<0.005

Expérimentation démultiplication volant

Données calculées pour chaque essai

Sujet	condition	std angle Volant (°)	moy speed Volant (rad.s ⁻¹)	std speed Volant (rad.s ⁻¹)	std couple conducteur (N)
a	Sn	15,4957	0,6393	34,5237	1,6649
a	Sd	18,5036	0,1	25,3857	1,356
a	Sn	16,2191	1,0765	32,9773	1,5097
a	Sd&c	16,3877	0,2209	20,1711	2,3345
b	Sn	18,3215	0,2329	20,3204	0,8332
b	Sd	16,9193	-0,3373	11,3531	0,6796
b	Sn	19,7052	0,6755	36,3543	1,5142
b	Sd&c	19,4426	0,5811	21,0607	2,2338
c	Sn	11,5321	0,8876	26,9637	1,5229
c	Sd	12,5456	0,2164	21,1295	1,1196
c	Sn	10,4987	0,6176	18,7835	1,3041
c	Sd&c	10,3682	-0,0126	10,5062	1,6577
d	Sn	13,7826	-0,1759	24,5348	1,28
d	Sd	11,6456	0,3055	12,7291	1,9504
d	Sn	12,9928	0,3124	30,1191	1,6158
d	Sd&c	13,5153	0,0774	18,3874	1,2067
e	Sn	9,6758	0,6483	17,2527	1,2807
e	Sd	10,8766	0,1759	15,3256	0,854
e	Sn	11,5587	0,1048	16,7363	1,1285
e	Sd&c	11,0983	0,3119	10,7553	1,5917

Significativité des comparaisons planifiées pour chaque paramètre

	Std (couple conducteur)	Std (vitesse volant)
<i>Sn vs Sd</i>	NS	NS
<i>Sn vs Sd&c</i>	p = 0,049688	p = 0,015946
<i>Sd vs Sd&c</i>	p = 0,020612	NS