

Modélisation de systèmes d'aide au contrôle latéral

6.1 Introduction

Cette partie expérimentale a pour objectif d'étudier l'adaptation des conducteurs à des systèmes d'aide au contrôle latéral. Pour le besoin des expérimentations, réalisées sur simulateurs de conduite, des systèmes d'aide au contrôle latéral ont été implémentés spécialement. Le développement de ces systèmes ne constituant pas le cœur de cette étude, ils avaient avant tout une vocation de prototype, afin d'illustrer les mécanismes d'adaptation engendrés par ce type de systèmes.

Ces expérimentations cherchant à observer l'effet de niveaux d'automatisation différents sur l'adaptation comportementale des conducteurs, deux systèmes d'aide au contrôle latéral ont été développés, illustrant deux niveaux d'automatisation différents : le Lane Departure Warning et le Lane Keeping Assistant.

6.2 Principe général

Sur une voiture réelle, le retour d'effort au volant résulte de contraintes mécaniques (résistance de la colonne de direction, des pneumatiques, etc), qui sont ensuite compensées par le système de direction assistée pour améliorer le confort de conduite. En revanche, sur un simulateur de conduite, le volant n'a pas de retour d'effort en raison de l'absence de ces contraintes mécaniques. Un modèle numérique de direction est donc utilisé, afin de restituer sur le volant un retour d'effort réaliste (Mohellebi et al., 2009). Au cours de la conduite, ce modèle calcule en temps réel une valeur de couple qui est envoyée à un restituteur d'effort qui applique ce couple au volant.

Les deux systèmes d'aide au contrôle latéral présentés dans ce chapitre agissent sur le volant. Ils calculent également un couple à appliquer au volant, qui est ajouté au couple résultant du modèle de la direction. Pour calculer ce couple, les systèmes d'aide au contrôle latéral se basent sur l'écart latéral instantané du véhicule. Cette mesure correspond à la distance entre l'axe central du véhicule et le centre de la voie, et prend des valeurs positives (respectivement négatives) pour les écarts à gauche (respectivement à droite) du centre de la voie. Comme le modèle proposé par Mohellebi et al. (2009), le couple calculé est ensuite ajouté au couple résultant du modèle de direction. Le couple total est alors envoyé au restituuteur d'effort.

6.3 Lane Departure Warning

6.3.1 Fonctionnement

Ce système d'aide au contrôle latéral est un système de type "alerte" : son but est de prévenir le conducteur d'une situation potentiellement dangereuse, et de la nécessité d'une action correctrice de sa part. Pour cela, lorsque l'écart latéral du véhicule dépasse un certain seuil, le Lane Departure Warning (LDW) produit un couple qui est envoyé au volant afin de le faire osciller. La figure 6.1 illustre ce principe.

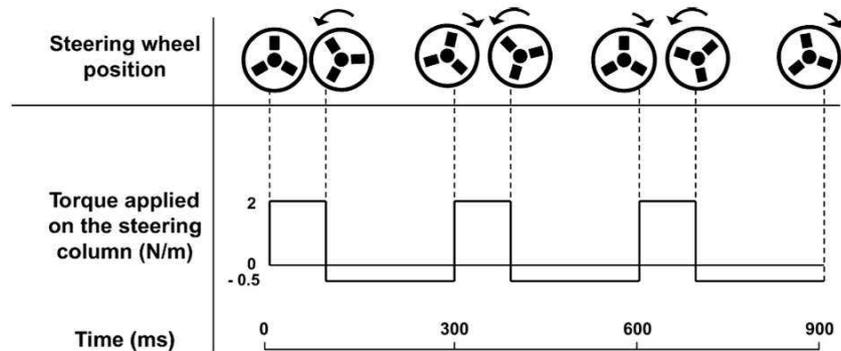


FIGURE 6.1 – Principe de l'amorçage moteur (d'après Navarro et al., 2010)

Lorsqu'il se déclenche, le LDW produit un couple volant sous forme d'un signal rectangulaire de période 300 ms. Ce signal est asymétrique, afin que le couple volant soit légèrement plus fort en direction du centre de la voie qu'en direction de la sortie de voie. Le couple généré par le LDW est de 2 N en direction du centre de la voie, et de 0.5 N en direction opposée.

En reprenant la typologie de Hoc et al. (2009), ce système d'aide correspond au mode de contrôle mutuel, et plus précisément au mode "amorçage moteur" (voir 3.2.1).

6.4 Lane Keeping Assistant

6.4.1 Fonctionnement

Le principe de ce système d'aide au contrôle latéral, plutôt qu'une alerte, est plus une coopération avec le conducteur. Ici, le système participe donc activement au contrôle du véhicule, sans pour autant se substituer totalement au conducteur humain. Pour cela, il applique un couple au volant proportionnel à l'écart latéral du véhicule. Cependant, comme ce système n'a pas vocation à remplacer le conducteur, le modèle ne calcule pas l'angle au volant optimal permettant de corriger la trajectoire. Au lieu de cela, le volant est piloté en couple uniquement, afin de compléter l'action du conducteur.

En reprenant la typologie de Hoc et al. (2009), ce système d'aide correspond également au mode de contrôle mutuel mais, contrairement au LDW, il utilise le mode "limite" plutôt que l'"amorçage moteur". Le mode "limite" consiste en effet à délivrer une résistance contre l'action du conducteur lorsque celui-ci s'éloigne des conditions de conduite sûre. Comme le soulignent les auteurs, ce mode de coopération devient plus intrusif dans le contrôle du véhicule que le mode précédent.

6.4.2 Modèle

Le modèle de Lane Keeping Assistant (LKA) calcule un couple à appliquer au volant en fonction de l'écart latéral du véhicule. Afin de fournir un couple volant continu et sans à-coups, ce modèle de LKA fonctionne selon trois états, chacun implémentant une loi différente. Ces trois états correspondent aux trois situations suivantes :

1. *Sortie de voie.* Cet état est sélectionné lorsque la valeur absolue de l'écart latéral croît.
2. *Retour vers le centre de la voie.* Cet état est sélectionné lorsque la valeur absolue de l'écart latéral décroît.
3. *Changement de voie.* Cet état est sélectionné lorsque la voie sur laquelle se trouve le véhicule est différente de celle où il se trouvait au pas de temps précédent.

Le tableau 6.1 définit les variables utilisées dans les lois de couple volant du modèle.

L'équation 6.1 présente la loi de couple volant lors de la sortie de voie.

$$\Gamma(\epsilon) = \left(\Gamma_{max} - |\hat{\Gamma}| \right) \cdot \left(\frac{\epsilon - \hat{\epsilon}}{|\epsilon_{max} - \hat{\epsilon}|} \right)^n + \hat{\Gamma} \quad (6.1)$$

La définition du couple relativement aux valeurs d'écart latéral et de couple à l'état précédent, respectivement $\hat{\epsilon}$ et $\hat{\Gamma}$, permet de s'assurer de la continuité du couple appliqué au volant lors du changement d'état.

TABLEAU 6.1 – Définition des variables utilisées par le modèle

Γ	Couple volant
ϵ	Ecart latéral du véhicule
Γ_{max}	Couple maximum
ϵ_{max}	Ecart latéral maximum
$\hat{\Gamma}$	Dernier couple à l'état précédent
$\hat{\epsilon}$	Dernier écart latéral à l'état précédent
n	Ordre de la loi "sortie de voie"
m	Ordre de la loi "retour vers le centre de la voie"

L'équation 6.2 présente la loi de couple volant lors du retour vers le centre de la voie.

$$\Gamma(\epsilon) = |\hat{\Gamma}| \cdot \left(\frac{\epsilon}{\hat{\epsilon}}\right)^m \cdot \frac{\epsilon}{|\epsilon|} \quad (6.2)$$

Le paramètre m , définissant l'ordre de la loi, permet de modifier l'amortissement du couple volant lors du retour vers le centre de la voie. En effet, en choisissant un paramétrage tel que $m > n$, le couple diminuera plus rapidement qu'il n'augmente lors de la sortie de voie. Cela est en effet souhaitable pour éviter des retours vers le centre de la voie trop brutaux, qui entraîneraient immédiatement une sortie de voie dans la direction opposée.

L'équation 6.3 présente la loi de couple volant lors du changement de voie.

$$\Gamma(\epsilon) = |\hat{\Gamma}| \cdot \left(\frac{\epsilon}{\hat{\epsilon}}\right)^m \cdot \frac{\hat{\Gamma}}{|\hat{\Gamma}|} \quad (6.3)$$

Le tableau 6.2 présente les valeurs appliquées aux paramètres du modèle. L'écart latéral maximum correspond à l'écart latéral lorsque le véhicule est sur la ligne de démarcation de voie, pour une voie de 3.5 m de large. Le couple maximum associé reprend le couple maximum délivré par le LDW.

TABLEAU 6.2 – Valeurs appliquées aux paramètres du modèle

$$\begin{aligned} n &= 1 \\ m &= 6 \\ \Gamma_{max} &= 2\text{ N} \\ \epsilon_{max} &= 1.75\text{ m} \end{aligned}$$

A titre d'exemple, la figure 6.2 présente un extrait d'enregistrement d'une conduite avec le LKA, représentant l'écart latéral du véhicule et le couple renvoyé par le modèle.

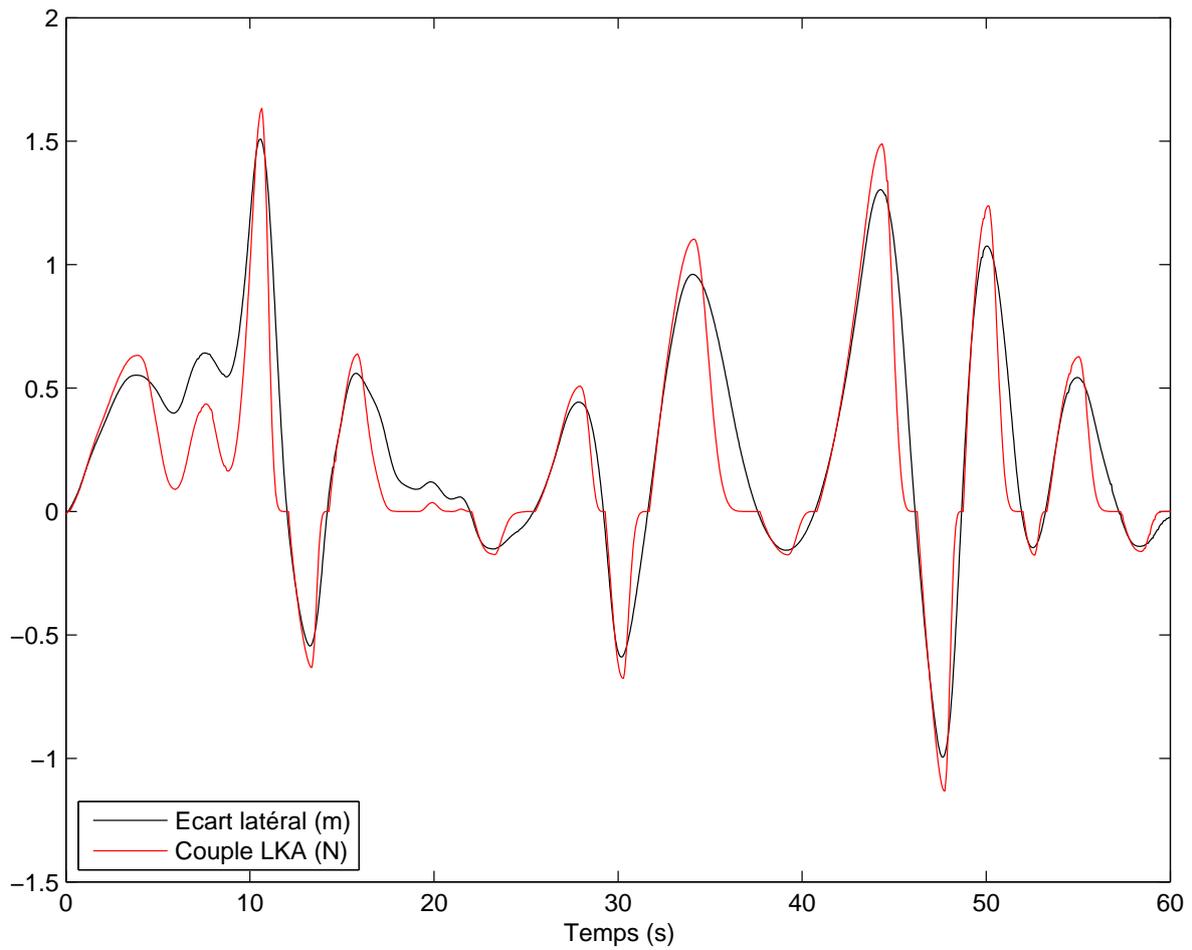


FIGURE 6.2 – Extrait d'enregistrement d'une conduite avec le LKA : la courbe noire représente l'écart latéral du véhicule et la courbe rouge représente le couple renvoyé par le modèle.

Chapitre 7

Assistance au contrôle latéral et situation d'urgence : expérience sur simulateur statique

Publié dans :

- Mas, A., Merienne, F., et Kemeny, A. (2011). Lateral control assistance and driver behavior in emergency situations. *International Conference on Road Safety and Simulation*, Indianapolis, IN.
- Mas, A., Merienne, F., et Kemeny, A. (2011). Lateral control assistance and driver behavior in emergency situations. *Advances in Transportation Studies* RSS2011 Special Issue, 149-158.

7.1 Introduction

Dans de nombreuses études, le concept de niveaux d'automatisation a été développé pour catégoriser le degré d'interaction entre l'Homme et la machine, allant du contrôle totalement manuel au contrôle totalement automatique (Sheridan et Verplanck, 1978; Endsley et Kaber, 1999; Parasuraman et al., 2000). Une autre classification a été proposée pour le contexte plus spécifique des systèmes d'aide à la conduite (Hoc et al., 2009), définissant quatre mode de coopération principaux : le mode de perception, le mode de contrôle mutuel, le mode de délégation de fonction, et le mode totalement automatique.

L'automatisation centrée sur l'humain a pour objectif de trouver le niveau d'automatisation le plus efficace pour une tâche donnée. En effet, des niveaux d'automatisation élevés n'impliquent pas nécessairement de meilleures performances, étant donné que l'opérateur humain peut avoir des difficultés à reprendre le contrôle lorsque nécessaire (Kaber et Endsley, 2004), principalement à cause de confiance excessive (Parasuraman et Riley, 1997).

Par conséquent, il est important d'étudier le comportement des conducteurs avec des systèmes d'aide à la conduite, dans des situations où ces systèmes ne fournissent pas d'aide (Saad, 2006). Ainsi, plusieurs études ont porté sur des situations de défaillance des systèmes d'aide à la conduite (Ben-Yaacov et al., 2002; Sullivan et al., 2008; Deborne et al., 2008), mais les situations d'urgence, pour lesquelles les systèmes d'aide à la conduite ne sont pas originellement conçus, ont suscité moins d'attention.

Quelques auteurs ont étudié le freinage d'urgence en présence de systèmes d'aide au contrôle longitudinal : Koustanaï et al. (2010) ont observé, sur un simulateur de conduite, moins de collisions avec le véhicule précédent parmi les conducteurs utilisant un système Forward Collision Warning que parmi les conducteurs n'utilisant pas d'assistance. En revanche, Nilsson (1995) a observé, sur un simulateur de conduite et dans une situation similaire, plus de collisions parmi les conducteurs utilisant un système Adaptive Cruise Control que parmi ceux n'utilisant pas d'assistance. En ce qui concerne les systèmes d'aide au contrôle latéral, Hoc et al. (2006) ont observé, lors d'un essai sur piste réelle, des difficultés pour les conducteurs à reprendre le contrôle afin d'éviter un obstacle, lorsqu'ils conduisaient avec un système d'aide au contrôle latéral utilisant le mode de délégation de fonction, mais pas de réel effet lorsqu'ils conduisaient avec un système d'aide au contrôle latéral utilisant le mode de contrôle mutuel. Néanmoins, les auteurs ont souligné que, malgré une apparente validité écologique, la méthode d'essai sur piste réelle comprenait trop de contraintes techniques et sécuritaires, et que des études sur simulateur de conduite étaient nécessaires.

Ainsi, l'objectif de cette expérimentation était d'étudier, sur un simulateur de conduite, la réaction de conducteurs utilisant un système d'aide au contrôle latéral lors d'une situation d'urgence nécessitant une reprise manuelle du contrôle latéral. Une situation d'urgence relevant du contrôle latéral mais non gérée par le système d'aide au contrôle latéral a donc été choisie : l'évitement d'obstacle. Etant donné qu'un effet du niveau d'automatisation semble émerger des études précédemment citées, deux systèmes d'aide au contrôle latéral différents ont été comparés, afin d'illustrer deux niveaux d'automatisation différents.

De plus, une autre facette de la question de cette expérimentation était de comprendre également l'origine des effets éventuels du système d'aide au contrôle latéral sur la réaction des conducteurs en situation d'urgence. En effet, ils peuvent être dus à deux facteurs : l'adaptation comportementale, résultant de l'expérience passée des conducteurs avec le système d'aide, ou le déclenchement du système d'aide au moment même de la situation d'urgence, qui pourrait avoir une action entrant en conflit avec la réaction des conducteurs cherchant à éviter l'obstacle.

7.2 Méthode

7.2.1 Matériel

Une expérimentation a été menée sur le simulateur d'éclairage du Centre Technique de Simulation de Renault (voir 4.3.1). Le simulateur (voir 4.3.1) est constitué d'un véhicule (Renault Scenic) équipé d'une boîte de vitesse automatique. La scène visuelle est projetée sur un écran cylindrique offrant un angle de vision de 210°.

Les deux systèmes d'aide au contrôle latéral décrits dans le chapitre précédent ont été utilisés. Afin de les distraire et de leur faire déclencher le système d'aide au contrôle latéral, les conducteurs devaient réaliser une tâche secondaire tout en conduisant. Cette tâche secondaire est appelée "surrogate reference task" (Mattes et Hallén, 2009; Petzoldt et al., 2011). Le but de cette tâche est de localiser une cible circulaire (190 mm de diamètre et 4 mm d'épaisseur) parmi 65 distracteurs (150 mm de diamètre et 5 mm d'épaisseur), affichés sur un écran déporté. Les participants devaient sélectionner la zone de la cible en déplaçant un curseur à l'aide d'un clavier embarqué. Une nouvelle tâche démarrait 15 secondes après le dernier mouvement du curseur. La consigne donnée aux participants était de réaliser la tâche le plus rapidement possible lorsqu'elle apparaissait, mais en donnant toujours la priorité à la sécurité de la conduite. La tâche secondaire était affichée sur un écran embarqué et les sujets interagissaient avec un petit clavier (de type pavé numérique), tous deux déportés sur la droite du tableau de bord, comme le montre la figure 7.1.

7.2.2 Participants

27 personnes ont participé à cette expérimentation (23 hommes et 4 femmes). Toutes étaient employées chez Renault. Les participants avaient un âge moyen de 36.2 ans ($\sigma = 10$), un permis de conduire valide depuis 17 ans en moyenne ($\sigma = 10.2$; $min = 3$), et n'étaient pas des pilotes experts. Leur kilométrage annuel moyen était de 18519 km ($\sigma = 13420$). Tous les sujets avaient une vision normale ou corrigée à la normale.

7.2.3 Protocole

Déroulement

Les sujets ont conduit selon un itinéraire d'environ 14 km, sur une route de campagne à deux voies. La figure 7.2 présente l'itinéraire suivi. La consigne qui leur était donnée était de conduire naturellement, en respectant le code de la route (la limite de vitesse était de 90 km/h, et 70 km/h ou 50 km/h dans les virages, selon le rayon de courbure). Du trafic était présent en sens inverse, afin d'inciter les conducteurs à rester sur leur voie.



FIGURE 7.1 – Dispositif expérimental, montrant la tâche secondaire sur la droite

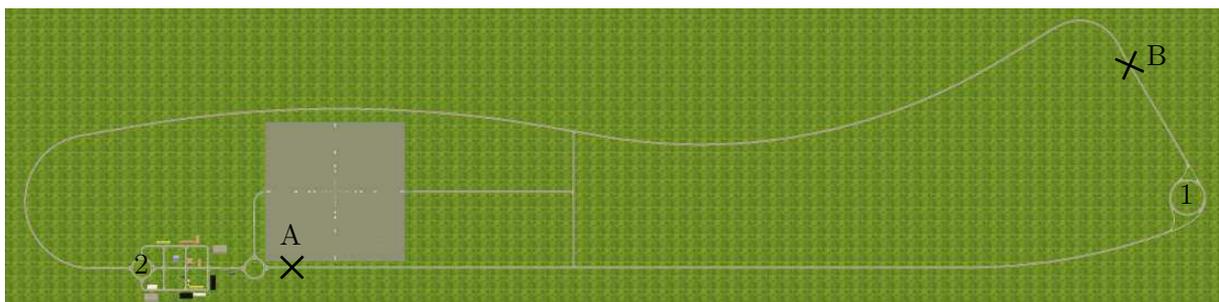


FIGURE 7.2 – Itinéraire suivi : les participants sont partis du point A, ont continué tout droit au rond-point n°1, ont fait demi-tour au rond-point n°2, et se sont arrêtés au point B.

L'expérimentation était divisée en deux conduites : une conduite de familiarisation et une conduite de test, suivant le même parcours. Chaque conduite durait environ 13 minutes. Pendant la conduite de familiarisation, les sujets ont conduit sans système d'aide au contrôle latéral, afin de s'habituer au simulateur et à la tâche secondaire. Ensuite, ils ont été répartis en trois groupes : le groupe contrôle, le groupe Lane Departure Warning (LDW) et le groupe Lane Keeping Assistant (LKA). Pendant la conduite de test, les sujets du groupe contrôle ont continué à conduire sans système d'aide, alors que les sujets des groupes LDW et LKA ont conduit avec leurs systèmes d'aide respectifs.

Situation d'urgence

A la fin de la conduite de test, les sujets ont rencontré une situation d'urgence : un camion était garé sur le bord de la route. La figure 7.3 illustre cette situation. Le camion était situé à la sortie d'un virage à droite, et derrière une rangée d'arbre, afin que les sujets ne le voient qu'au dernier moment. Il n'y avait pas de trafic en sens inverse au moment de la situation d'urgence, pour permettre aux sujets de doubler le camion. Cet évènement n'a eu lieu qu'une seule fois pour chaque sujet, afin de conserver l'effet de surprise.

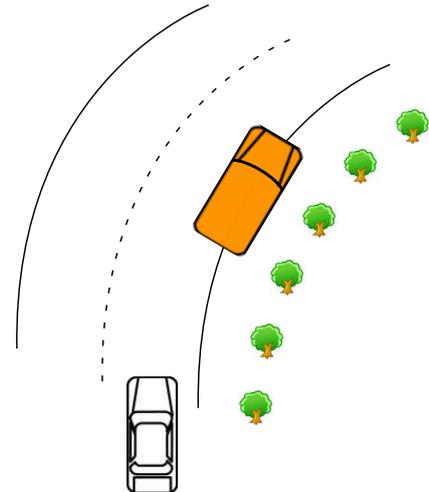


FIGURE 7.3 – Situation d'urgence

Questionnaire

Les sujets des groupes LDW et LKA ont également eu un questionnaire à remplir, portant sur leur évaluation subjective du système d'aide qu'ils utilisaient. Ce questionnaire, traduit en français à partir de l'original en anglais proposé par van der Laan et al. (1997), propose les 9 items présentés dans le tableau 7.1. Il mesure l'acceptation subjective d'un système d'aide à la conduite selon

deux dimensions : l'utilité et la satisfaction. Pour chacun des items, les sujets devaient situer sur une échelle l'opinion qu'ils avaient du système d'aide, entre deux adjectifs contraires.

Comme préconisé par les auteurs du questionnaire original, ce questionnaire a été présenté aux sujets avant et après la conduite de test. Avant, les sujets avaient pour consigne d'évaluer le système d'aide à la conduite tel qu'ils l'imaginaient, en se basant sur la description orale qu'ils en avaient eue. Après, ils avaient pour consigne d'évaluer le système d'aide qu'ils venaient d'utiliser en situation de conduite. Ces deux questionnaires seront mentionnés dans la suite de ce chapitre comme les questionnaires "avant" et "après".

TABLEAU 7.1 – Items du questionnaire présenté aux sujets.

utile					inutile
plaisant					déplaisant
mauvais					bon
agréable					agaçant
efficace					superflu
irritant					appréciable
d'une grande aide					sans intérêt
non souhaitable					souhaitable
stimulant					soporifique

7.3 Analyse de données

7.3.1 Conduite normale

Afin de mesurer l'apport des systèmes d'aide au contrôle latéral, le suivi de trajectoire a été évalué sur deux portions différentes de l'itinéraire : une courbe vers la droite (de longueur 1020 m et de rayon de courbure 244 m) et une ligne droite (de longueur 910 m). La trajectoire de référence que nous avons choisie est la ligne imaginaire suivant le centre de la voie de droite, afin de mesurer la capacité des sujets à rester dans cette voie (aucun changement de voie n'était nécessaire au cours de la conduite).

Dans cette optique, l'intégrale curviligne de l'écart latéral (ICEL) du véhicule du sujet a été calculée, par rapport à cette trajectoire de référence (Mattes, 2003). L'ICEL est représenté sur la figure 7.4. Cette valeur correspond à l'aire entre le centre de la voie et la trajectoire du véhicule, au cours d'un itinéraire donné. Elle représente ainsi la quantité de déviation autour de l'axe central de la voie

Afin d'analyser l'apport des systèmes d'aide au contrôle latéral, nous avons réalisé, pour la ligne droite et la courbe :

- Une analyses de la variance (ANOVA) sur l'ICEL pendant la conduite de familiarisation, avec

le groupe comme variable indépendante, ou un test de Kruskal-Wallis dans le cas où les données ne suivent pas une loi normale. Ce test a pour but de vérifier l'absence de biais initial entre les groupes.

- Pour chaque groupe, un test de Wilcoxon, comparant deux-à-deux les valeurs d'ICEL entre la conduite de familiarisation et la conduite de test.

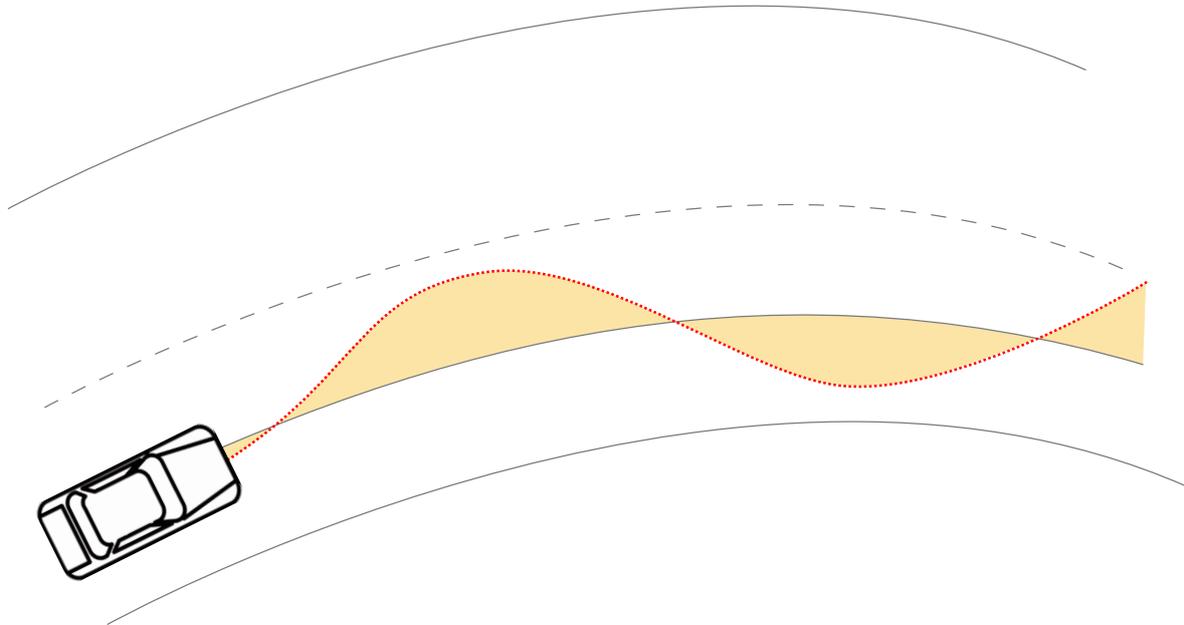


FIGURE 7.4 – Intégrale curviligne de l'écart latéral (ICEL) : aire représentée en jaune.

Une deuxième analyse a été réalisée sur l'ICEL dans la courbe, afin de déterminer si les effets des systèmes d'aide au contrôle latéral agissaient principalement sur les déviations vers la gauche ou vers la droite. Ainsi, l'ICEL a été séparé en deux grandeurs : l'ICEL gauche (ICEL pour les positions à gauche du centre de la voie) et l'ICEL droite (ICEL pour les positions à droite du centre de la voie). Des tests de Wilcoxon ont donc été réalisés, comme décrit précédemment, sur les ICEL gauche et droite.

7.3.2 Situation d'urgence

Indicateurs globaux

Les indicateurs suivants ont été mesurés, afin de qualifier la sécurité globale de la manœuvre d'évitement :

- Le *time-to-collision* au début de la manœuvre d'évitement, noté TTC_0 .
- Le temps passé sur la voie de gauche pendant l'évitement, noté T_{gauche} .

- L'écart latéral maximum pendant l'évitement, noté $\overline{max}(\epsilon)$, mesuré par rapport au centre de la voie de droite.
- La distance minimale à l'obstacle pendant l'évitement, notée $\min(D_{obstacle})$.

Le TTC définit le temps avant la collision entre deux véhicules (voir 2.4, équation 2.6). On peut donc le définir, dans le cas présent où le véhicule de devant est à l'arrêt, par l'équation 7.1 :

$$TTC(t) = \frac{D(t)}{V(t)} \quad (7.1)$$

Où $D(t)$ est la distance inter-véhicules (distance longitudinale, suivant le tracé de la route, et non distance euclidienne), et $V(t)$ la vitesse du véhicule du sujet.

Dans le cas présent de l'évitement d'obstacle, le *time-to-collision* au début de la manœuvre d'évitement est utilisé pour quantifier le temps de réaction des sujets. En effet, plus la valeur de TTC_0 est petite, plus la réaction des sujets est tardive.

La distance à l'obstacle $D_{obstacle}(t)$ correspond à la distance euclidienne, à un instant t , entre le véhicule du sujet et le camion. Les véhicules dans SCANeR© étant représentés au sol par des rectangles, les distances entre chacun des quatre segments délimitant le véhicule du sujet et chacun des quatre segments délimitant le camion sont calculées, à l'aide de l'algorithme proposé par Lumelsky (1985). La distance $D_{obstacle}$ correspond donc à la valeur minimale de ces distances calculées.

L'indicateur $\min(D_{obstacle})$ correspond ainsi à la marge de sécurité que laissent les sujets entre leur véhicule et le camion lors de l'évitement.

Accélération latérale

D'après Reymond et al. (2001), lors de la prise de virage les conducteurs ajustent leur vitesse de façon à maintenir l'accélération latérale du véhicule en-dessous d'un maximum accepté. Selon les auteurs, les conducteurs se fixent un tel seuil afin de garder une "marge de sécurité" au cas où un évènement imprévu les forcerait à dévier de leur trajectoire.

La situation d'urgence créée pour cette expérimentation représentant un tel évènement, il était donc attendu que son évitement génère une accélération latérale supérieure à ce seuil. Nous avons donc cherché à quantifier ce pic d'accélération latérale, et à observer si une régulation par la vitesse est également possible lors d'une telle situation d'urgence. La figure 7.5 représente un exemple d'enregistrement de l'accélération latérale en fonction de la vitesse, tout au long de la conduite de test (qui inclue donc la situation d'urgence).

Les profils observés sont très différents de ceux observés par Reymond et al. (2001). En effet, les auteurs observaient uniquement des prises de virage, pour des virages de courbures variées,

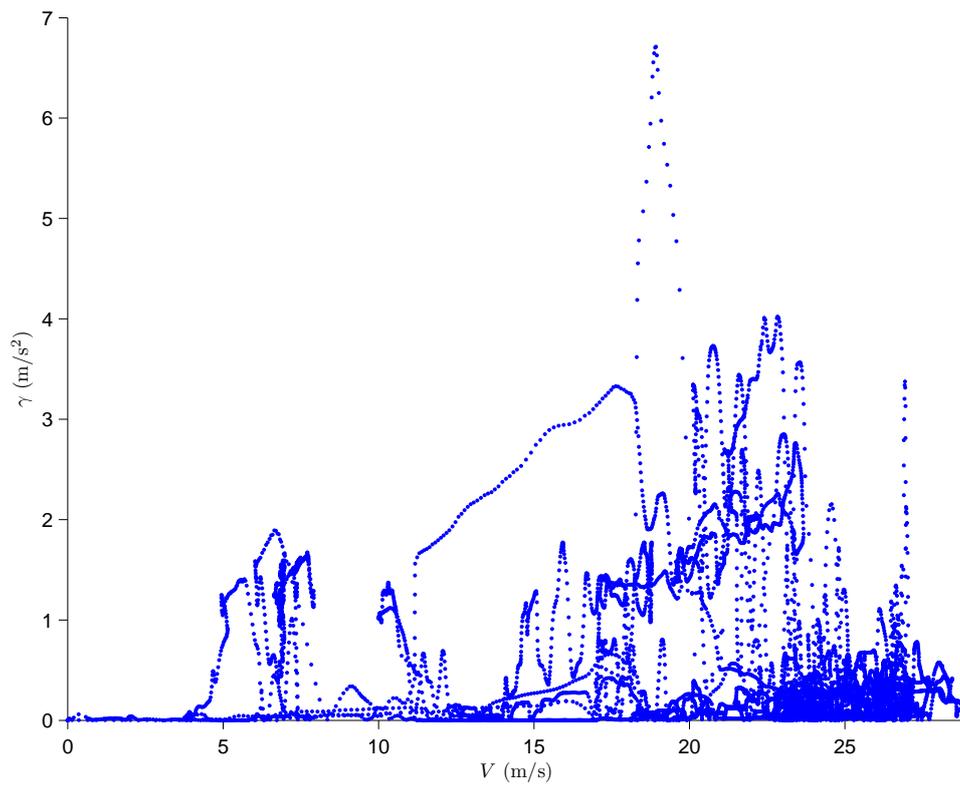


FIGURE 7.5 – Représentation de l'accélération latérale γ en fonction de la vitesse V pendant la conduite de test. Exemple pour un sujet.

alors qu'ici l'enregistrement comprend de la conduite en ligne droite aussi bien qu'en virage (et la prise de virage n'étant pas l'objet principal de cette expérimentation, les rayons de courbure varient ici dans une fourchette plus restreinte).

Il est cependant intéressant de noter, pour la plupart des sujets, un pic d'accélération latérale. Sur la figure 7.5, on peut par exemple observer un pic à presque $7m/s^2$ pour une vitesse légèrement inférieure à $20m/s$. Ce pic correspond vraisemblablement à l'évitement de l'obstacle à la fin de la conduite.

Nous avons donc, pour chaque sujet, extrait de l'enregistrement la portion de route où se déroulait la situation d'urgence, puis calculé sur cet intervalle l'accélération latérale maximale ainsi que la vitesse associée (i.e. la vitesse du véhicule au moment où il atteignait cette accélération maximale). Ces données ont également été calculées sur la même portion de route lors de la conduite de familiarisation (donc sans situation d'urgence) afin d'évaluer le gain en accélération latérale que représentait cet évitement d'obstacle. Afin d'évaluer d'une part l'influence de la situation d'urgence, et d'autre part celle du système d'aide sur ces deux valeurs, des ANOVAs à mesures répétées ont été réalisées.

Décomposition de la manœuvre d'évitement

La figure 7.6 représente un exemple typique de manœuvre d'évitement de l'obstacle. Dans cette manœuvre, nous pouvons distinguer trois phases successives :

1. Premièrement, les conducteurs ont réagi rapidement, en appliquant une correction au volant vers la gauche, afin d'éviter l'obstacle (entre les temps t_0 et t_1).
2. Deuxièmement, les conducteurs ont contrebraqué dans la direction opposée afin de revenir vers la voie de droite (entre les temps t_1 et t_2).
3. Troisièmement, les conducteurs ont ramené puis stabilisé le volant autour de la position centrale (à ce stade de la manœuvre, la route était en ligne droite), afin de continuer la conduite sur la voie de droite (entre les temps t_2 et t_3). Le critère choisi pour la stabilisation du volant était que l'angle reste entre -5° et $+5^\circ$ (relativement à la position centrale) pendant 3 secondes, à partir du temps t_3 .

Dans la suite de ce chapitre, nous nous référerons à ces trois étapes en tant que phase 1, phase 2 et phase 3.

Analyse par phase

Afin de mieux comprendre les effets des systèmes d'aide au contrôle latéral, nous avons analysé la façon dont les conducteurs ont évité l'obstacle, pour chaque groupe et pour chaque phase. Cette manœuvre implique deux boucles de contrôle différentes. En effet, comme suggéré par Reid (1983), les conducteurs réagissent d'abord rapidement à la situation initiale, en utilisant

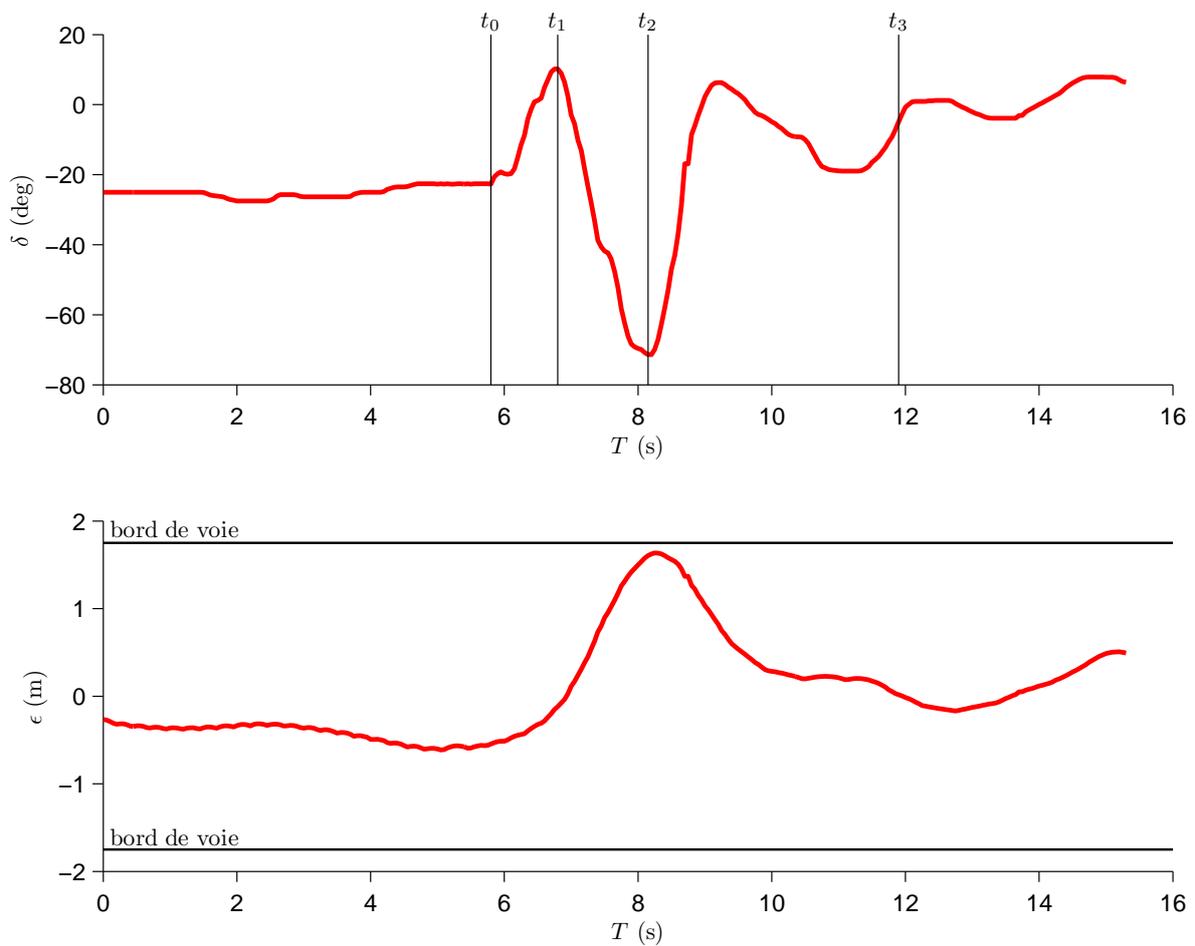


FIGURE 7.6 – Exemple d’une manœuvre d’évitement. Le graphique du dessus montre l’angle volant δ en fonction du temps. Le graphique du dessous montre l’écart latéral ϵ en fonction du temps. Les valeurs positives correspondent à un angle volant ou un écart latéral vers la gauche.

une stratégie de contrôle en boucle ouverte (phase 1). Puis, une fois suffisamment proches de la trajectoire souhaitée, ils basculent sur un contrôle latéral utilisant une stratégie de contrôle en boucle fermée (phases 2 et 3). Les systèmes d'aide au contrôle latéral sont susceptibles de modifier les deux boucles de contrôle, que nous pouvons alors étudier séparément en utilisant le découpage par phases précédemment proposé. En effet, nous avons émis l'hypothèse que seuls les effets de la familiarisation avec les systèmes d'aide modifieraient le contrôle en boucle ouverte (McRuer et al., 1977), alors que les effets dus au déclenchement des systèmes d'aide pendant la manœuvre d'évitement modifieraient uniquement le contrôle en boucle ouverte. De plus, comme nous pouvons le voir sur la figure 7.6, au temps t_1 , les conducteurs avaient à peine commencé à dévier de leur trajectoire, et n'avaient par conséquent pas encore déclenché leur éventuel système d'aide au contrôle latéral.

Pour chaque phase, nous avons cherché à caractériser l'importance relative de la réaction et de l'anticipation des conducteurs. En effet, la réaction peut être traduite par la façon dont la situation initiale a déterminé l'action des conducteurs, alors que l'anticipation peut être traduite par la façon dont leur action a déterminé la situation finale. Nous avons ainsi évalué, pour chacune des trois phases, la corrélation entre des indicateurs décrivant la criticité de la situation initiale (au début de la phase), la réponse des conducteurs, et la criticité de la situation finale (à la fin de la phase). Cette approche est similaire à celle proposée par van Winsum et al. (1999).

Pendant la phase 1, nous avons caractérisé la criticité de la situation par l'angle de l'obstacle. Cette mesure représente la direction du camion dans le référentiel du véhicule du sujet, défini de façon à ce qu'un angle nul corresponde à un obstacle droit devant, un angle positif à un obstacle sur la droite du sujet, et un angle négatif à un obstacle sur la gauche du sujet. Fajen et Warren (2003) ont en effet montré que cet angle influençait la trajectoire d'évitement de l'obstacle. L'angle de l'obstacle a été calculé à t_0 et à t_1 , et appelé respectivement θ_0 et θ_1 . La figure 7.7 illustre ces deux valeurs. Ainsi, cette variable définit le niveau de criticité de la situation : comme les sujet doivent éviter le camion par la gauche, un angle de l'obstacle plus petit signifie une situation plus critique.

La réponse des conducteurs à cette situation a été mesurée par l'amplitude de la correction au volant, appelée δ_1 , et la durée de la correction au volant, appelée τ_1 . δ_1 correspond à la différence d'angle volant entre t_0 et t_1 . τ_1 correspond à la durée de la phase 1.

Des ANOVAs à un facteur ont été réalisées avec le groupe comme variable indépendante, et δ_1 et τ_1 comme variables dépendantes. Pour chaque groupe, des régressions linéaires ont également été réalisées, afin d'expliquer δ_1 et τ_1 par θ_0 , et θ_1 par δ_1 et τ_1 .

Pendant la phase 2, nous avons caractérisé la criticité de la situation à t_1 par le *time-to-line-crossing* (TLC), et appelé TLC_1 . Cet indicateur, défini par Godthelp et al. (1984), mesure le temps nécessaire pour le véhicule, en considérant la vitesse et l'angle volant constants, pour sortir de sa voie. Ici, TLC_1 est mesuré par rapport au bord gauche de la route. La réponse des conducteurs pendant la phase 2 a été mesurée par l'amplitude de la correction au volant, appelée δ_2 , et la durée de la correction au volant, appelée τ_2 , ces deux indicateurs étant calculés comme

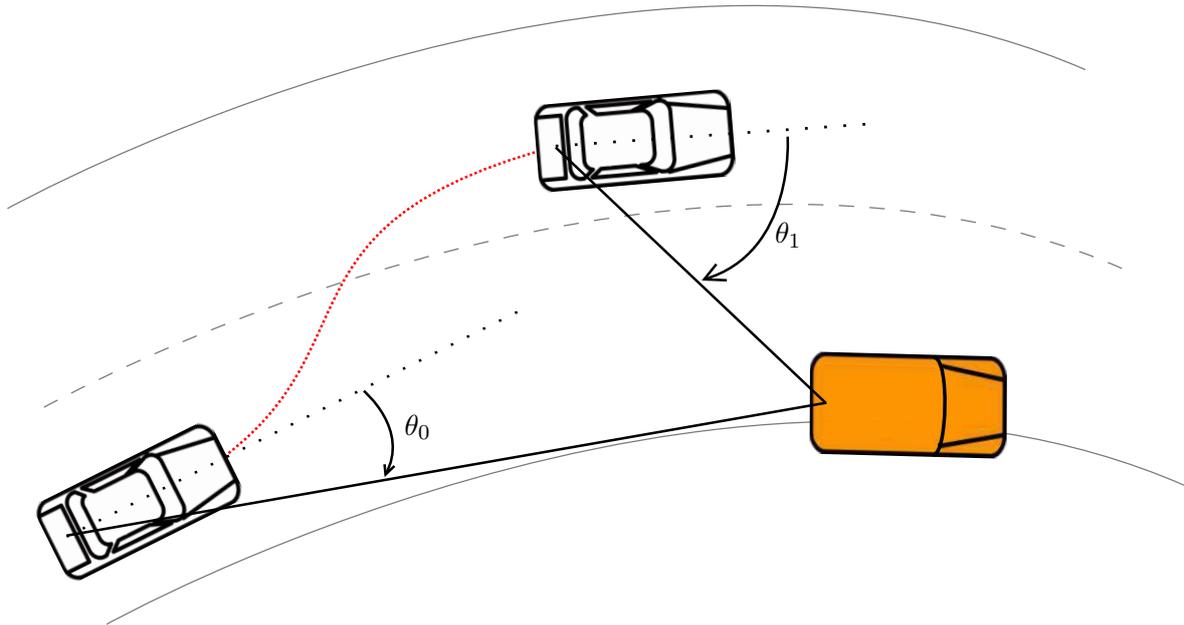


FIGURE 7.7 – Angles de l’obstacle θ_0 et θ_1 , aux temps t_0 et t_1 . La ligne rouge en pointillé représente la trajectoire du véhicule.

défini précédemment pour la phase 1. L’état de la situation à t_2 a été caractérisé par la position latérale, appelée ϵ_2 .

Des ANOVAs à un facteur ont été réalisées avec le groupe comme variable indépendante, et δ_2 et τ_2 comme variables dépendantes. Pour chaque groupe, des régressions linéaires ont également été réalisées, afin d’expliquer δ_2 et τ_2 par TLC_1 , et ϵ_2 par δ_2 et τ_2 .

Pendant la phase 3, nous avons caractérisé l’état de la situation à t_2 par la position latérale, appelée ϵ_2 . La réponse des conducteurs a été mesurée par le temps de stabilisation, appelé τ_3 , utilisant le critère défini précédemment. τ_3 correspond donc à la durée de la phase 3.

Une ANOVA à un facteur a été réalisée avec le groupe comme variable indépendante, et τ_3 comme variable dépendante. Pour chaque groupe, des régressions linéaires ont également été réalisées, afin d’expliquer τ_3 par ϵ_2 .

7.3.3 Questionnaire

Ainsi que l’ont défini van der Laan et al. (1997), les scores aux différents items du questionnaire (voir tableau 7.1) sont codés de +2 à -2 (de -2 à +2 pour les items 3,6 et 8). La moyenne des scores aux items 1,3,5,7 et 9 donne le score d’utilité, et la moyenne des scores aux items 2,4,6 et 8 donne le score de satisfaction.

Des tests de Student ont été réalisés, afin de comparer les scores d'utilité et de satisfaction entre les groupes LDW et LKA, pour chaque questionnaire. Pour chaque groupe, des tests de Student appariés ont également été réalisés, afin de comparer les scores du questionnaire "avant" et ceux du questionnaire "après". Ces tests permettent en effet de mesurer l'évolution de l'opinion des sujets après avoir testé le système d'aide à la conduite en conduite.

7.3.4 Tâche secondaire

Pour mesurer le niveau de performance à la tâche secondaire, le temps moyen de réponse à une tâche ainsi que les nombres de bonnes et de mauvaises réponses ont été enregistrés. Des ANOVAs ont ensuite été réalisées afin de comparer ces scores entre les différents groupes.

Dans cette expérimentation, la tâche secondaire était un moyen d'introduire de la distraction chez les sujets, plutôt qu'un moyen de mesure. Les sujets étaient de plus libres de répondre à cette tâche quand ils le pouvaient. Ces analyses servent donc principalement à vérifier que le taux de réponse à la tâche secondaire, et donc le niveau de distraction, était équivalent entre les groupes.

7.4 Résultats

7.4.1 Homogénéité des groupes

Il n'y avait aucune différence significative d'âge ($F(2, 24) = 0.13; p = 0.88$) ni de sexe ($\chi^2(2) = 0.07; p = 0.96$) entre les groupes.

7.4.2 Conduite normale

Ligne droite

La figure 7.8 présente les moyennes d'ICEL dans la ligne droite. Les résultats n'ont montré aucune différence significative d'ICEL entre les groupes durant la conduite de familiarisation ($H(2, 27) = 1.28; p = 0.53$). La comparaison entre l'ICEL pendant la conduite de familiarisation et pendant la conduite de test n'a montré aucune différence significative pour le groupe contrôle ($Z = 1.72; p = 0.09$), ni pour le groupe LDW ($Z = 1.48; p = 0.14$), ni pour le groupe LKA ($Z = 1.48; p = 0.14$).

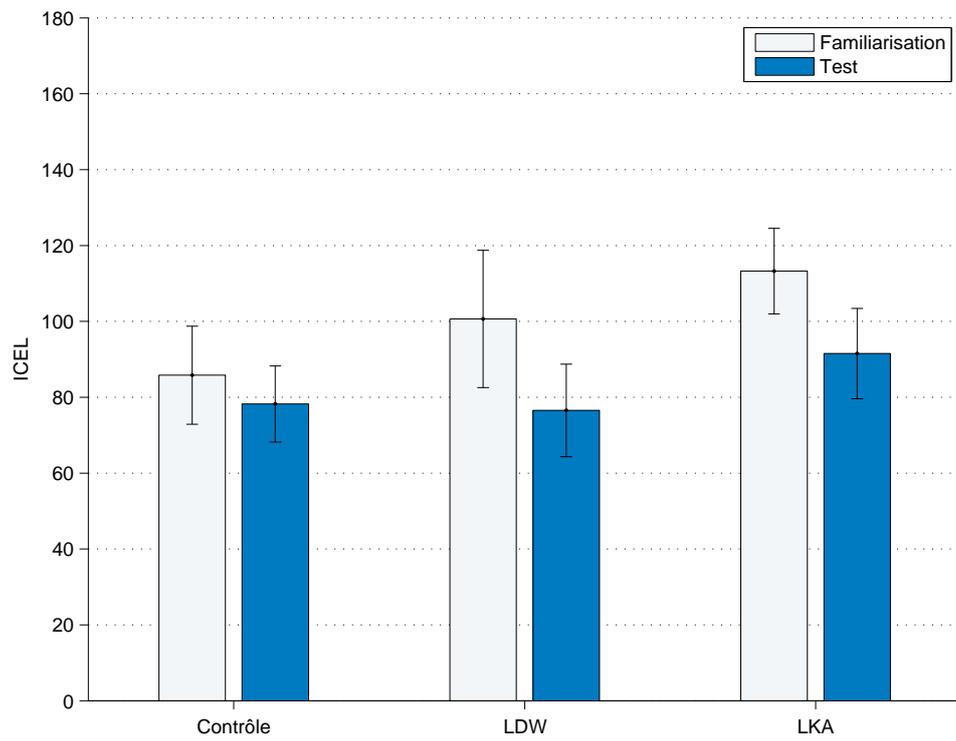


FIGURE 7.8 – Moyennes d’ICEL dans la ligne droite, pour chacun des groupes. Les barres d’erreur représentent les erreurs types.

Courbe

La figure 7.9 présente les moyennes d'ICEL dans la courbe. Les résultats n'ont montré aucune différence significative d'ICEL entre les groupes durant la conduite de familiarisation ($F(2, 24) = 0.06; p = 0.94$). La comparaison entre l'ICEL pendant la conduite de familiarisation et pendant la conduite de test n'a montré aucune différence significative pour le groupe contrôle ($Z = 0.77; p = 0.44$), mais une différence significative pour le groupe LDW ($Z = 2.19; p < 0.03$), et pour le groupe LKA ($Z = 2.67; p < 0.01$).

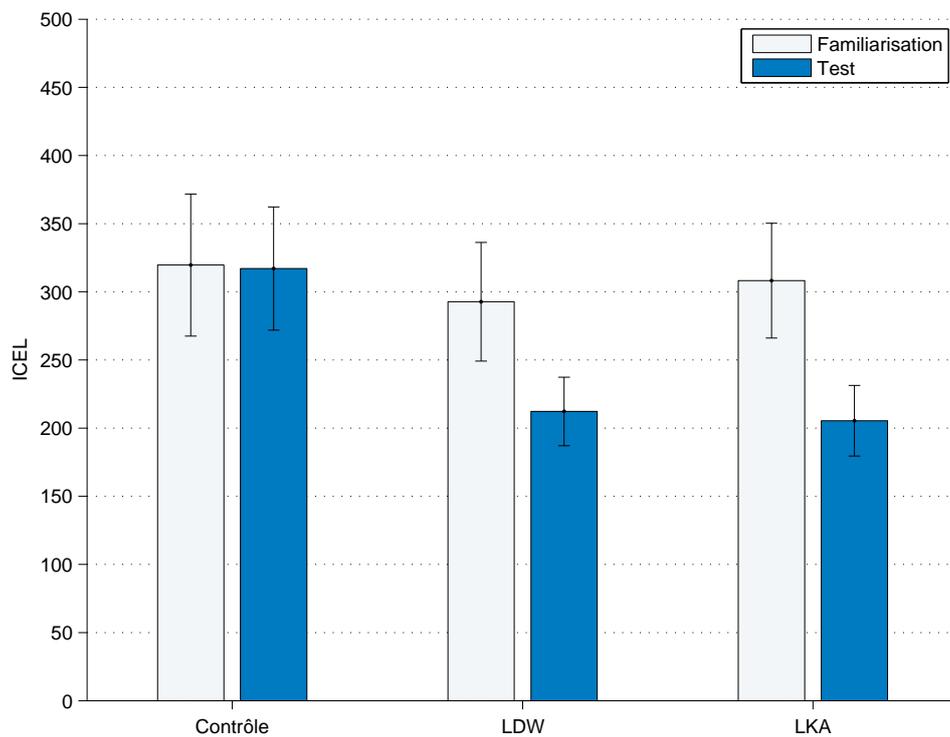


FIGURE 7.9 – Moyennes d'ICEL dans la courbe, pour chacun des groupes. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

La figure 7.10 présente les moyennes d'ICEL gauche et droite dans la courbe. Les résultats ont montré, pour le groupe LKA, une diminution significative de l'ICEL gauche lors de la conduite de test, par rapport à la conduite de familiarisation. Le tableau 7.2 résume ces résultats. Tous groupes confondus, les résultats n'ont pas montré de différence significative entre l'ICEL droite et l'ICEL gauche, que ce soit pour la conduite de familiarisation ($Z = 1.71; p = 0.09$) ou pour la conduite de test ($Z = 1.9; p = 0.06$).

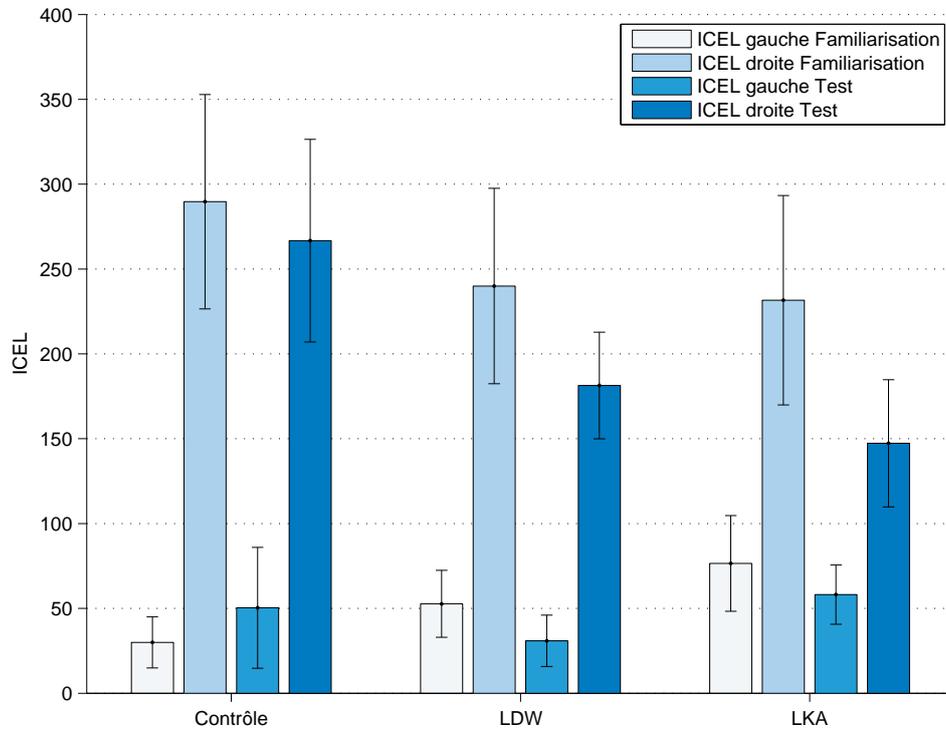


FIGURE 7.10 – Moyennes d’ICEL gauche et droite dans la courbe, pour chacun des groupes. Les barres d’erreur représentent les erreurs types.

TABLEAU 7.2 – Résultats des tests de Wilcoxon sur les ICEL gauche et droite, entre la conduite de familiarisation et la conduite de test.

Groupe	ICEL gauche	ICEL droite
Contrôle	$Z = 1.24; p = 0.21$	$Z = 0.77; p = 0.44$
LDW	$Z = 1.95; p = 0.05$	$Z = 1.6; p = 0.11$
LKA	$Z = 2.07; p < 0.04$	$Z = 1.6; p = 0.11$

7.4.3 Situation d'urgence

Tous les sujets, de tous les groupes, ont réussi à éviter le camion. Seul un sujet du groupe LKA a perdu le contrôle de son véhicule après avoir dépassé le camion, et a quitté la route.

Indicateurs globaux

Les valeurs moyennes de TTC_0 , T_{gauche} , $max(\epsilon)$ et $min(D_{obstacle})$ sont illustrées par la figure 7.11. Les résultats n'ont montré aucun effet significatif du groupe sur ces indicateurs : TTC_0 ($F(2, 24) = 1.72; p = 0.20$), T_{gauche} ($H(2, 27) = 0.37; p = 0.83$), $max(\epsilon)$ ($F(2, 24) = 0.05; p = 0.95$), et $min(D_{obstacle})$ ($F(2, 24) = 2.56; p = 0.10$).

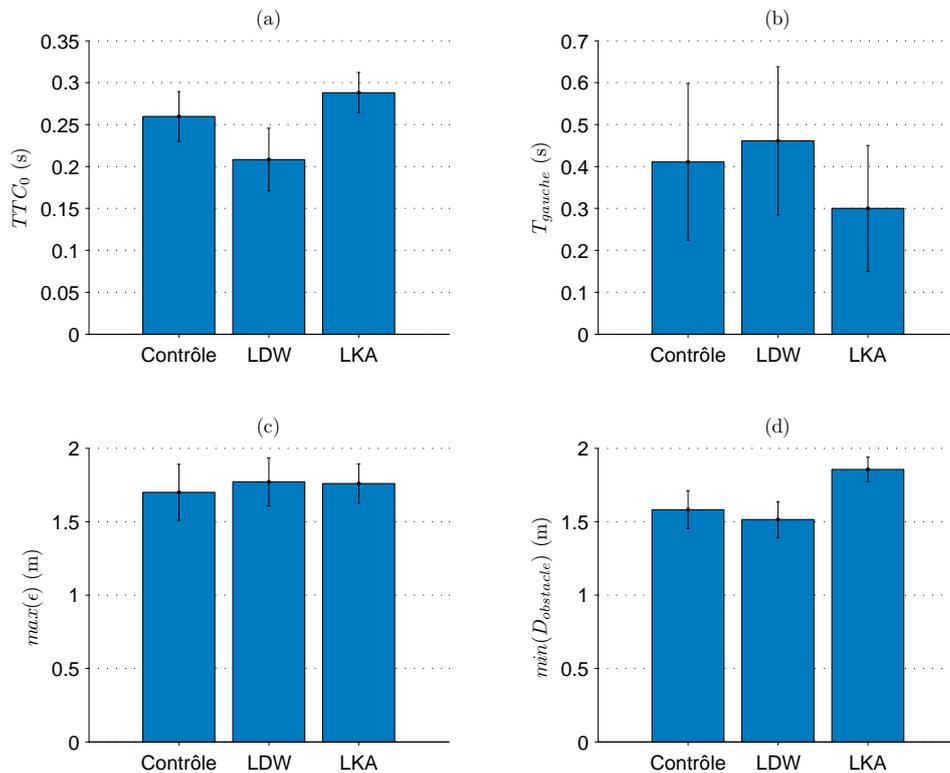


FIGURE 7.11 – Moyennes des indicateurs globaux de sécurité de la manœuvre d'évitement : (a) *time-to-collision* au début de la manœuvre ; (b) temps passé sur la voie de gauche ; (c) écart latéral maximum ; (d) distance minimale à l'obstacle. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Accélération latérale

La figure 7.12 montre les valeurs d'accélération latérale maximale et de vitesse associée, en situation de conduite normale et en situation d'urgence et pour chacun des groupes.

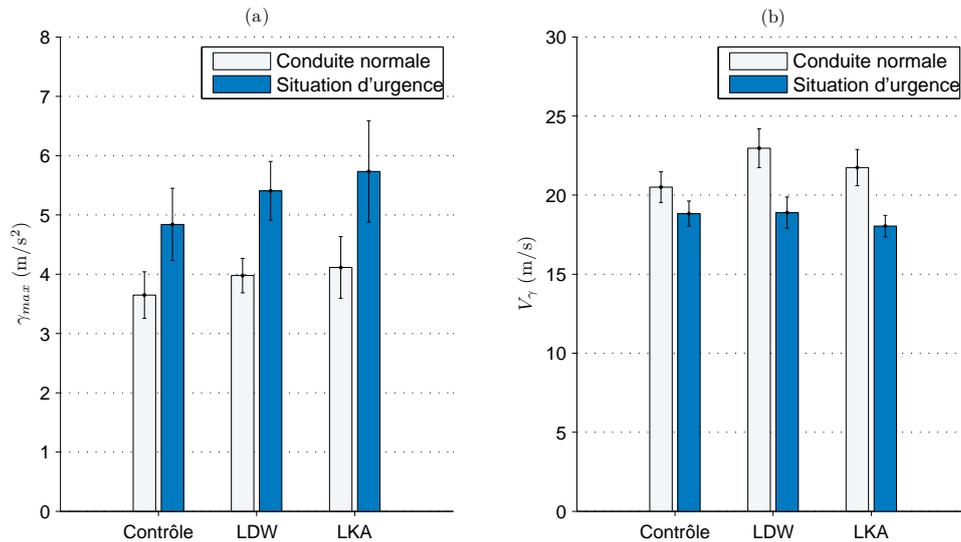


FIGURE 7.12 – (a) Accélération latérale maximale γ_{max} ; (b) Vitesse associée V_γ . Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Les résultats montrent une augmentation significative de l'accélération latérale maximale γ_{max} lors de la situation d'urgence ($F(1, 24) = 12.29; p < 0.01$), mais pas d'effet principal du groupe sur cette mesure ($F(2, 24) = 0.64; p = 0.54$).

Les résultats montrent également une diminution significative de la vitesse associée V_γ lors de la situation d'urgence ($F(1, 24) = 24.51; p < 0.001$), mais pas d'effet principal du groupe sur cette mesure ($F(2, 24) = 0.68; p = 0.51$).

Décomposition de la manœuvre d'évitement

Concernant la manœuvre d'évitement dans son ensemble, à t_1 , la valeur de l'angle au volant était relativement faible : il était de 4.93° en moyenne ($\sigma = 14.84$), et n'était pas significativement différent de 0° ($t(26) = 1.73; p = 0.1$). Les sujets ont commencé à contrebraquer avant d'atteindre leur déviation latérale maximale ($t(26) = 28.92; p < 0.01$), 1.65 secondes plus tôt en moyenne. La valeur de θ_0 était de 8.23° en moyenne ($\sigma = 1.28$).

Phase 1

Durant la phase 1, les résultats n'ont montré aucun effet significatif du groupe, ni sur δ_1 ($F(2, 24) = 0.2; p = 0.82$), ni sur τ_1 ($F(2, 24) = 0.95; p = 0.4$).

Le tableau 7.3 résume les résultats des régressions linéaires sur δ_1 . Ces résultats montrent une corrélation significative entre θ_0 et δ_1 pour les groupes LDW et LKA, et une corrélation significative entre δ_1 et θ_1 pour les groupes contrôle et LDW.

TABLEAU 7.3 – Relations entre la situation et l'amplitude de correction au volant durant la phase 1.

Groupe	Régression de δ_1 sur θ_0			Régression de θ_1 sur δ_1		
	β	p	R^2 ajusté	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	-0.425	0.254	0.064	0.737	0.024	0.477
LDW	-0.790	0.011	0.571	0.743	0.022	0.488
LKA	-0.865	0.003	0.713	-0.501	0.169	0.144

Les signes des coefficients β , dans le tableau 7.3, montrent que pour les groupes LDW et LKA, plus l'angle de l'obstacle était petit à t_0 (i.e. plus l'obstacle était à gauche), plus l'amplitude de correction au volant était importante. De la même façon, pour les groupes contrôle et LDW, plus l'amplitude de correction au volant était importante, plus l'angle de l'obstacle était grand à t_1 (i.e. plus l'obstacle était à droite).

Le tableau 7.4 résume les résultats des régressions linéaires sur τ_1 . Ces résultats montrent une corrélation significative entre θ_0 et τ_1 pour le groupe contrôle.

TABLEAU 7.4 – Relations entre la situation et la durée de correction au volant durant la phase 1.

Groupe	Régression de τ_1 sur θ_0			Régression de θ_1 sur τ_1		
	β	p	R^2 ajusté	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	0.719	0.029	0.449	-0.368	0.330	0.012
LDW	-0.187	0.630	~ 0	0.163	0.674	~ 0
LKA	0.292	0.446	~ 0	0.186	0.631	~ 0

Le signe du coefficient β , dans le tableau 7.4, montre que pour le groupe contrôle, plus l'angle de l'obstacle était petit à t_0 (i.e. plus l'obstacle était à gauche), plus la durée de correction au volant était courte.

Phase 2

Durant la phase 2, les résultats n'ont montré aucun effet significatif du groupe, ni sur δ_2 ($F(2, 24) = 0.58; p = 0.57$), ni sur τ_2 ($F(2, 24) = 1.25; p = 0.30$).

7.4. RÉSULTATS

Le tableau 7.5 résume les résultats des régressions linéaires sur δ_2 . Ces résultats montrent une corrélation significative entre TLC_1 et δ_2 pour le groupe LDW.

TABLEAU 7.5 – Relations entre la situation et l’amplitude de correction au volant durant la phase 2.

Groupe	Régression de δ_2 sur TLC_1			Régression de ϵ_2 sur δ_2		
	β	p	R^2 ajusté	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	-0.477	0.195	0.117	-0.628	0.070	0.307
LDW	-0.847	0.004	0.677	0.504	0.166	0.148
LKA	-0.563	0.115	0.212	-0.102	0.794	~ 0

Le signe du coefficient β , dans le tableau 7.5, montre que pour le groupe LDW, plus le TLC était faible à t_1 (i.e. plus la sortie de route vers la gauche était imminente), plus l’amplitude de correction au volant était importante.

Le tableau 7.6 résume les résultats des régressions linéaires sur τ_2 . Ces résultats montrent une corrélation significative entre TLC_1 et τ_2 pour tous les groupes.

TABLEAU 7.6 – Relations entre la situation et la durée de correction au volant durant la phase 2.

Groupe	Régression de τ_2 sur TLC_1			Régression de ϵ_2 sur τ_2		
	β	p	R^2 ajusté	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	0.814	0.008	0.614	0.117	0.764	~ 0
LDW	0.854	0.003	0.690	-0.660	0.053	0.355
LKA	0.760	0.018	0.517	-0.099	0.800	~ 0

Les signes des coefficients β , dans le tableau 7.6, montrent que pour tous les groupes, plus le TLC était faible à t_1 (i.e. plus la sortie de route vers la gauche était imminente), plus la durée de correction au volant était courte.

Phase 3

Durant la phase 3, les résultats n’ont montré aucun effet significatif du groupe sur τ_3 ($F(2, 24) = 1.77; p = 0.19$). Le tableau 7.7 résume les résultats des régressions linéaires sur τ_3 .

7.4.4 Questionnaire

La figure 7.13 présente les scores d’utilité et de satisfaction des questionnaires “avant” et “après”. Les résultats montrent, pour le questionnaire “après”, un score d’utilité significativement plus grand pour le groupe LDW que pour le groupe LKA, mais aucune différence significative entre

TABLEAU 7.7 – Relations entre la position latérale et le temps de stabilisation durant la phase 3.

Groupe	Régression de τ_3 sur ϵ_2		
	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	-0.504	0.167	0.147
LDW	0.214	0.580	~ 0
LKA	0.253	0.511	~ 0

les groupes sur le score de satisfaction. Le tableau 7.8 présente les résultats des différents tests effectués.

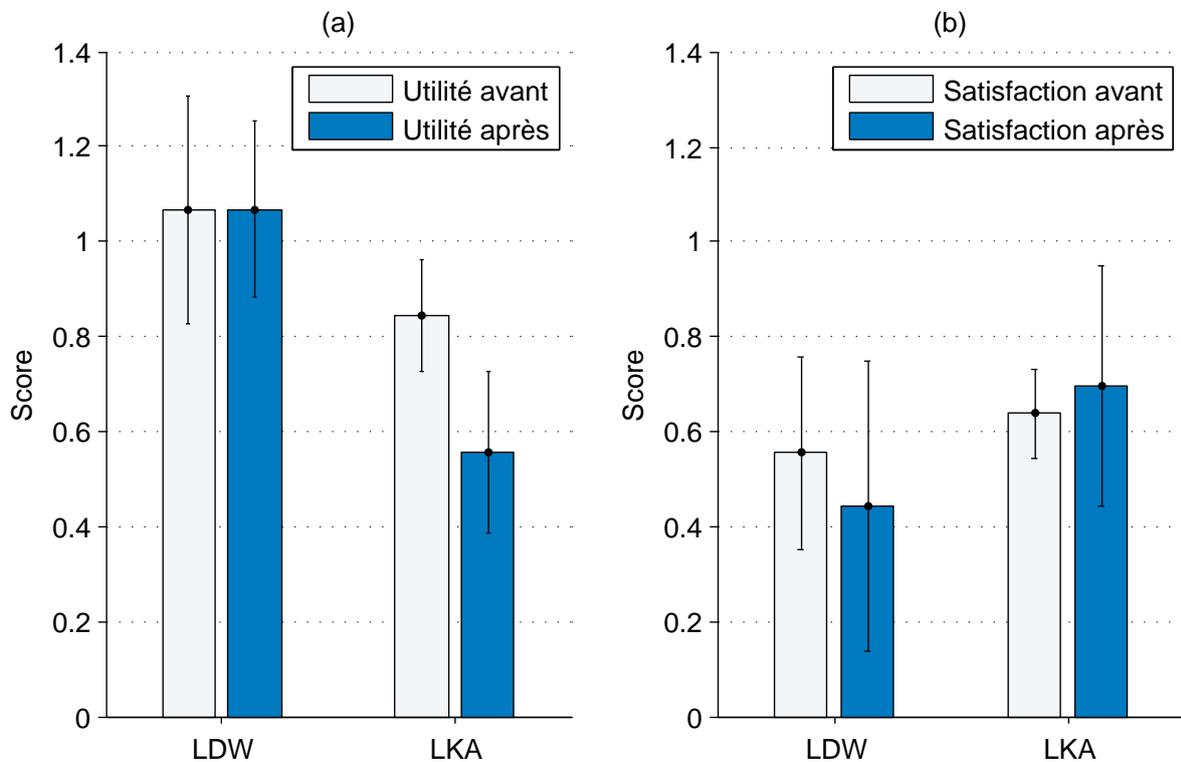


FIGURE 7.13 – Scores moyens des questionnaires “avant” et “après” : (a) utilité, (b) satisfaction. Les barres d’erreur représentent les erreurs types.

Les tests de Student appariés ne montrent pas d’évolution significative des scores entre les questionnaires “avant” et “après”. Le tableau 7.9 synthétise ces résultats.

TABLEAU 7.8 – Résultats des tests de Student entre les groupes LDW et LKA.

Questionnaire	Utilité	Satisfaction
Avant	$t(16) = 0.83; p = 0.42$	$t(16) = -0.37; p = 0.71$
Après	$t(16) = 2.31; p = 0.03$	$t(16) = -0.63; p = 0.54$

TABLEAU 7.9 – Résultats des tests de Student appariés entre les questionnaires “avant” et “après”.

Groupe	Utilité	Satisfaction
LDW	$t(8) = -0.21; p = 0.84$	$t(8) = 0.42; p = 0.69$
LKA	$t(8) = 1.49; p = 0.17$	$t(8) = -0.23; p = 0.82$

7.4.5 Tâche secondaire

La figure 7.14 présente les résultats de la tâche secondaire, pour chacun des groupes. Les résultats n’ont montré aucune différence significative entre les groupes, ni sur le temps moyen de réponse ($H(2, 27) = 2.78; p = 0.25$), ni sur le nombre de bonnes réponses ($F(2, 24) = 1.39; p = 0.27$), ni sur le nombre de mauvaises réponses ($F(2, 24) = 1.12; p = 0.34$).

7.5 Discussion

7.5.1 Conduite normale

Les analyses de la conduite normale ont porté sur une ligne droite et une courbe. Lors de la conduite en ligne droite, les résultats n’ont montré aucune différence significative sur l’ICEL entre la conduite de familiarisation et la conduite de test. Les systèmes d’aide au contrôle latéral semblent donc ne pas avoir introduit de changement sur le contrôle latéral en ligne droite. En revanche, lors de la conduite en courbe, les résultats ont montré des différences significatives d’ICEL entre la conduite de familiarisation et la conduite de test. En effet, pour les sujets des groupes LDW et LKA, l’ICEL était plus faible pendant la conduite de test que pendant la conduite de familiarisation. Il semble donc que les systèmes LDW et LKA ont poussé les sujets, lors d’une conduite en courbe, à adopter une trajectoire de conduite plus proche du centre de la voie.

Une analyse plus approfondie a été réalisée, afin de déterminer plus précisément comment ces systèmes d’aide ont modifié la trajectoire des conducteurs, et si leur effet portait plutôt sur les déviations vers la gauche ou sur les déviations vers la droite (la courbe était orientée vers la droite). En séparant ainsi l’ICEL en ICEL gauche et ICEL droite, les résultats n’ont montré, pour les sujets du groupe LDW, aucune différence significative sur aucun de ces deux indicateurs, entre la conduite de familiarisation et la conduite de test. La réduction d’ICEL observée avec ce système n’est donc pas particulièrement marquée vers la gauche ou vers la droite, mais répartie

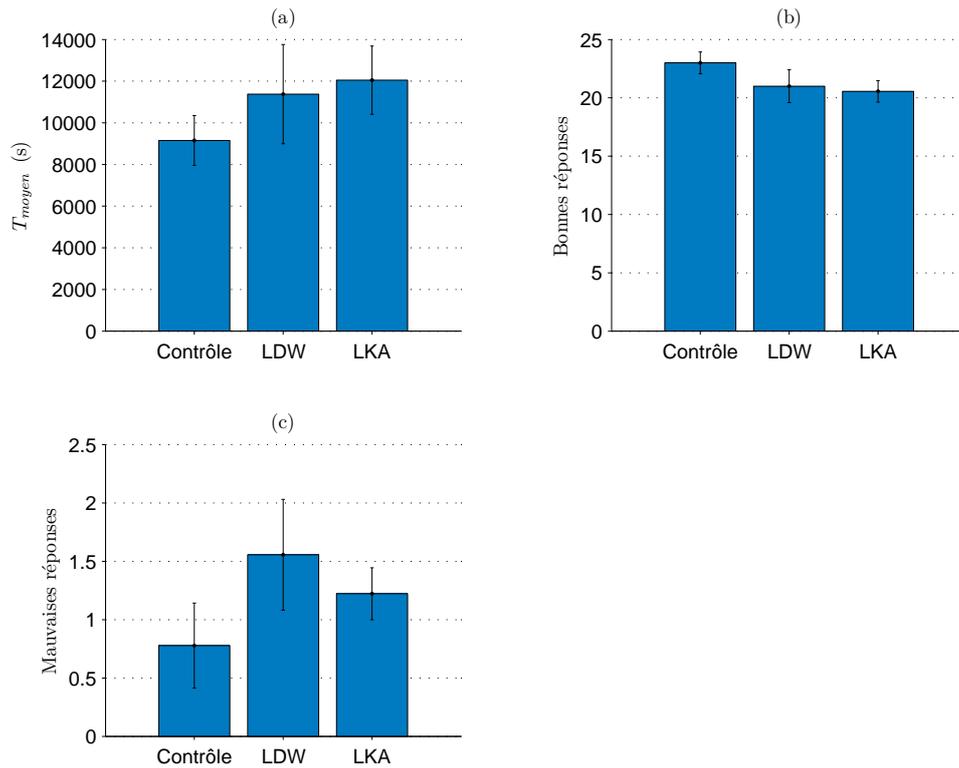


FIGURE 7.14 – Résultats de la tâche secondaire, pour chaque groupe : (a) temps moyen de réponse à une tâche, (b) nombre de bonnes réponses, (c) nombre de mauvaises réponses. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

entre les deux. En revanche, pour les sujets du groupe LKA, les résultats n'ont montré aucune différence significative sur l'ICEL droite, mais une diminution significative de l'ICEL gauche pendant la conduite de test. Ce système d'aide a donc principalement empêché les déviations vers la gauche, soit vers l'extérieur de la courbe. Nous pensons donc qu'à vitesse plus élevée, un tel système pourrait réduire les risques de sous-virage.

Il est également intéressant de noter que ces résultats confirment la pertinence par rapport à ces systèmes d'aide de la situation d'urgence étudiée dans ce chapitre. En effet, son but était d'illustrer une situation où une action d'urgence était nécessaire au niveau du contrôle latéral, mais pour laquelle les systèmes d'aide n'assistaient pas les conducteurs. Ici, l'obstacle à éviter se trouvait sur la droite de la route, à la sortie d'un virage vers la droite. Les résultats précédemment cités montrent donc que ni le LDW ni le LKA n'ont aidé les conducteurs à se placer dans une position plus propice à l'évitement de l'obstacle. En revanche, en se basant sur ces mêmes résultats, nous pensons que la situation serait très différente dans le cas d'une situation d'urgence identique mais ayant lieu à la sortie d'un virage vers la gauche. Dans ce cas en effet, les sujets utilisant le LKA seraient vraisemblablement dans une position initiale facilitant l'évitement de l'obstacle (soit moins vers l'extérieur du virage).

7.5.2 Situation d'urgence

Globalement, les sujets ont réussi à éviter le camion assez facilement. Ils ont pour cela donné un coup de volant vers la gauche d'amplitude relativement faible, et ont contrebraqué rapidement. Ils ont en effet commencé à contrebraquer avant d'atteindre leur déviation latérale maximale vers la gauche, cela confirmant une manœuvre d'évitement souple. Cela est probablement dû à la courbure de la route (l'évènement se produisant en sortie d'un virage à droite), qui leur a permis de dévier rapidement de leur trajectoire. Contrairement aux manœuvres de dépassement (voir par exemple Younsi et al. (2009)), cette manœuvre ne présentait pas de phase de stabilisation sur la voie de gauche, probablement en raison de la plus grande différence de vitesse entre les véhicules.

Les résultats sur l'accélération latérale ont montré que lors de la situation d'urgence, les sujets ont atteint une accélération latérale maximale plus importante que lors d'une prise de virage normale, tout en adoptant cependant une vitesse plus faible. Cela confirme le caractère urgent et inattendu de la manœuvre d'évitement, pour laquelle les conducteurs n'ont pas pu limiter l'accélération latérale comme lors d'une prise de virage normale, tel que le suggèrent Raymond et al. (2001).

Les résultats pour la première phase de l'évitement, à savoir le coup de volant rapide, suggèrent que la réaction des sujets du groupe LKA était principalement déterminée par la criticité de la situation initiale (soit l'angle de l'obstacle). En revanche, la réaction des sujets du groupe contrôle était principalement déterminée par la criticité de la situation finale (soit l'angle de l'obstacle après le coup de volant). Pour les sujets du groupe LDW, représentant un niveau d'automatisation intermédiaire, ces deux relations ont été observées conjointement. Ces résultats

tendent donc à montrer que l'automatisation a généré plus de réaction et moins d'anticipation chez les conducteurs, lors de la situation d'urgence.

Dans le cadre de cette expérimentation, l'amplitude de variation de l'angle de l'obstacle était plutôt restreinte mais, étant donnés ces résultats, nous pensons que des valeurs plus extrêmes de l'angle de l'obstacle entraîneraient une plus grande amplitude de correction au volant, particulièrement pour les conducteurs utilisant le LKA. De telles situations pourraient donc poser des difficultés pour reprendre le contrôle du véhicule après l'évitement. Dans cette expérimentation, un sujet du groupe LKA a perdu le contrôle de son véhicule. Bien que ce cas unique n'entraîne pas de différence significative entre les groupes, nous pensons qu'une situation plus critique (i.e. présentant un angle de l'obstacle plus petit, ce qui pourrait être obtenu soit en plaçant le camion plus à gauche, soit reproduisant l'évènement à un emplacement où le rayon de courbure de la route est plus faible) pourrait accentuer ce phénomène.

A l'inverse, les effets des systèmes d'aide au contrôle latéral pendant la deuxième et la troisième phase de l'évitement (à savoir, le contrebraquage vers la droite et la stabilisation sur la voie de droite, respectivement) apparaissent limités. Les différences observées portaient principalement sur la première phase. Par conséquent, les résultats supportent donc plutôt l'hypothèse d'un effet des systèmes d'aide au contrôle latéral sur le contrôle en boucle ouverte, effet dû à l'apprentissage passé avec les systèmes d'aide.

7.5.3 Questionnaire

Les évaluations subjectives des systèmes d'aide au contrôle latéral par les sujets, après la conduite de test, ont montré que le système LDW a été jugé plus utile que le système LKA. En revanche, aucune différence significative entre LDW et LKA n'a été montrée sur la satisfaction, ni sur l'évolution de ces deux scores entre les questionnaires "avant" et "après". Ces résultats vont dans le sens de l'hypothèse posée par Navarro et al. (2010), selon laquelle l'acceptation et l'efficacité réelle d'un système d'aide à la conduite ne sont pas nécessairement corrélées. Dans l'expérimentation présentée dans ce chapitre, les sujets ont en effet évalué le système LKA moins efficace que le système LDW, alors que les résultats des analyses sur les indicateurs objectifs de la conduite ont montré une efficacité comparable de ces deux systèmes.

7.5.4 Tâche secondaire

Les résultats n'ont montré aucune différence significative de performance à la tâche secondaire entre les groupes. Ils confirment ainsi que le niveau de distraction volontairement créée par la tâche secondaire était équivalent pour tous les groupes.

7.6 Conclusion

Dans cette expérimentation, nous avons utilisé un simulateur de conduite statique, afin d'étudier la réaction des conducteurs lors d'une manœuvre d'évitement d'obstacle, en présence d'un système d'aide au contrôle latéral. Nous avons pour cela utilisé deux niveaux d'automatisation différents. Les résultats ont tout d'abord confirmé l'efficacité des systèmes d'aide au contrôle latéral pour améliorer le contrôle latéral lors de la conduite en courbe, et ont montré que les conducteurs assistés aussi bien que non assistés ont réussi à éviter l'obstacle.

Cependant, une analyse détaillée de la manœuvre d'évitement a donné des résultats prometteurs, suggérant un effet des systèmes d'aide au contrôle latéral dans la première phase de la manœuvre (le coup de volant rapide), qui est supposée impliquer principalement du contrôle en boucle ouverte (Reid, 1983). En effet, la réaction des sujets conduisant avec un système d'aide au contrôle latéral pendant cette phase était déterminée par le niveau de criticité de la situation initiale (spécialement pour un système d'aide au contrôle latéral présentant un niveau d'automatisation élevé). A l'inverse, chez les sujets conduisant avec un système d'aide au contrôle latéral présentant un niveau d'automatisation intermédiaire, ou sans système d'aide, la réaction pendant cette phase déterminait le niveau de sécurité final. Ces résultats suggèrent un possible effet négatif des systèmes d'aide au contrôle latéral présentant un niveau d'automatisation élevé, lors de situations d'urgence plus critiques.

Nos résultats tendent également à montrer que l'influence des systèmes d'aide au contrôle latéral lors de la situation d'urgence est plus vraisemblablement une modification du comportement des conducteurs due à l'apprentissage préalable de ces systèmes, plutôt qu'une gêne due au déclenchement de ces systèmes pendant la manœuvre d'évitement.

Au cours de nos futures études, nous chercherons à créer de nouveaux scénarios d'urgence, afin d'accentuer les tendances observées dans cette expérimentation. Dans cette optique, le chapitre suivant présente une nouvelle expérimentation, dans laquelle une situation d'urgence plus critique a été utilisée, ainsi qu'un simulateur dynamique, l'apport de la restitution de mouvement dans le contrôle latéral étant connu (Kemeny et Panerai, 2003). De tels scénarios pourraient être utiles dans le futur, pour étudier la réaction des conducteurs dans les phases amont de la conception des systèmes d'aide à la conduite.

