

Influence de la restitution de mouvements

9.1 Introduction

Les expérimentations présentées dans les deux chapitres précédents ont été réalisées sur deux simulateurs différents : la première sur un simulateur statique (voir 4.3.1), et la deuxième sur un simulateur dynamique (voir 4.3.2). Ces deux expérimentations, quoique relativement proches et partageant le même protocole, ont montré des résultats relativement différents. Un des objectifs de cette thèse étant de discuter de la pertinence et de la validité des simulateurs de conduite pour le type d'études précédemment décrites, ce chapitre est donc consacré à la mise en parallèle des résultats des deux expérimentations. En effet, les deux simulateurs utilisés étaient très différents, principalement de part l'apport de la restitution de mouvement sur le simulateur dynamique. L'objectif de ce chapitre est donc d'étudier l'influence qu'a eu la restitution de mouvements sur le comportement observé chez les conducteurs. Les résultats et leurs implications seront ainsi discutées de ce point de vue.

De nouvelles analyses ont pour cela été conduites, afin de comparer les données des deux expérimentations. Ici, l'accent a été mis sur le facteur "simulateur" plutôt que sur le facteur "système d'aide à la conduite", qui a déjà été traité dans les chapitres précédents.

9.2 Analyse de données

9.2.1 Conduite normale

L'intégrale curviligne de l'écart latéral (ICEL) calculée dans les chapitres précédents (voir 7.3.1), en ligne droite et en courbe, a été comparée entre les deux simulateurs, à l'aide de tests de Mann-Whitney.

9.2.2 Situation d'urgence

Indicateurs globaux

Afin de comparer la réaction des sujets lors de la situation d'urgence, entre les deux expérimentations précédentes, les indicateurs suivants (voir 7.3.2) ont été comparés :

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

Des tests de Student et de Mann-Whitney ont été réalisés afin d'évaluer les différences sur ces indicateurs entre les deux simulateurs.

Accélération latérale

Lors des deux expérimentations précédentes, l'accélération latérale maximale ainsi que la vitesse associée ont été mesurées sur la même portion de route, lors d'une prise de virage normale et lors de la situation d'urgence (voir 7.3.2). Afin d'évaluer l'influence de la restitution de mouvements sur ces valeurs, nous avons réalisé des tests de Mann-Whitney ainsi qu'une ANOVA à mesures répétées.

9.2.3 Questionnaire

Les réponses aux deux questionnaires, présentés avant et après la conduite avec système d'aide, ont été comparées entre les deux simulateurs. Pour cela, des tests de Student et de Mann-Whitney ont été réalisés. Les systèmes étant identiques dans les deux expérimentations, aucune différence n'était attendue dans les réponses aux questionnaires. Cette analyse avait donc principalement

pour but de vérifier l'homogénéité des évaluations subjectives entre les deux simulateurs, et donc l'absence de biais.

9.2.4 Tâche secondaire

Des tests de Mann-Whitney ont été réalisés sur les données de la tâche secondaire (temps moyen de réponse à une tâche, nombre de bonnes réponses, nombre de mauvaises réponses), afin de comparer le niveau de performance entre les deux simulateurs. Comme l'analyse par groupe, celle-ci servait principalement à vérifier que le niveau de distraction entre les deux expérimentations était comparable (voir 7.3.4).

9.3 Résultats

9.3.1 Conduite normale

La figure 9.1 présente les moyennes d'ICEL pour les simulateurs statique et dynamique.

On peut voir sur ces graphiques que l'ICEL est globalement plus faible sur le simulateur dynamique que sur le simulateur statique. Les analyses confirment cette tendance pour l'ICEL en ligne droite pendant la conduite de familiarisation ($U(27, 33) = 297; Z = 2.21; p < 0.03$) mais pas pour les autres situations, à savoir, l'ICEL en ligne droite pendant la conduite de test ($U(27, 33) = 326; Z = 1.78; p = 0.08$), l'ICEL en courbe pendant la conduite de familiarisation ($U(27, 33) = 345; Z = 1.49; p = 0.14$) et l'ICEL en courbe pendant la conduite de test ($U(27, 33) = 439; Z = 0.1; p = 0.92$).

9.3.2 Situation d'urgence

Indicateurs globaux

La figure 9.2 présente les moyennes, par simulateur, des différents indicateurs globaux de la situation d'urgence.

Les analyses prouvent que la réaction à la situation d'urgence sur simulateur dynamique, comparée à celle sur simulateur statique, montre une augmentation significative de TTC_0 ($U(27, 32) = 28; Z = -6.15; p < 0.001$), une augmentation significative de T_{gauche} ($U(27, 32) = 69, Z = -5.58; p < 0.001$), une augmentation significative de $max(\epsilon)$ ($t(57) = -5.53; p < 0.001$) et une diminution significative de $min(D_{obstacle})$ ($t(57) = 4.5; p < 0.001$).

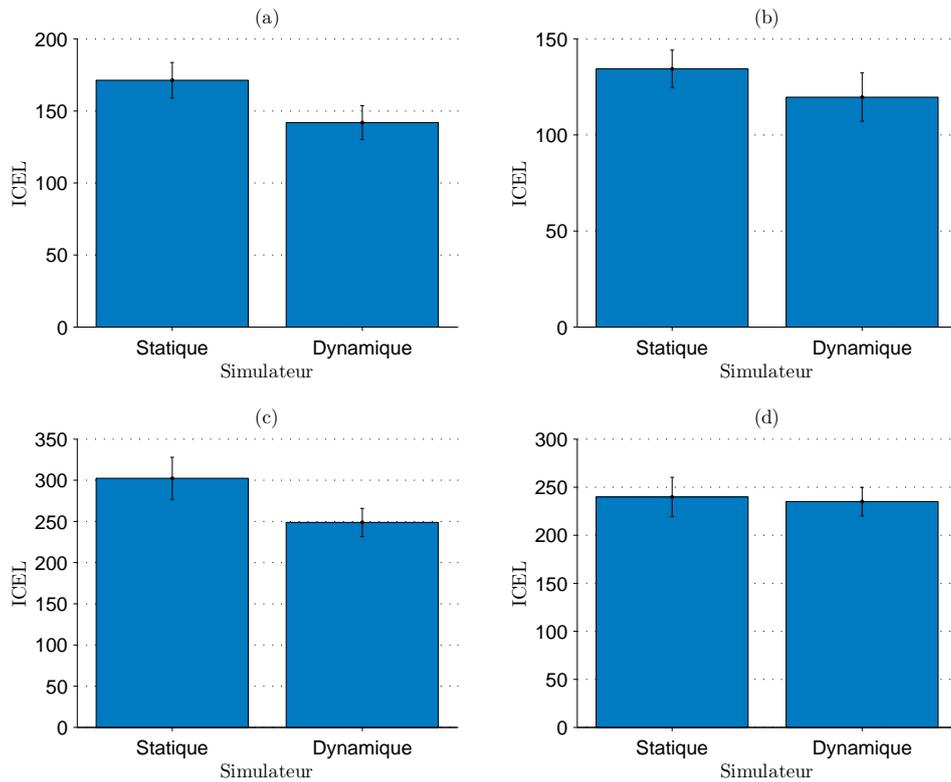


FIGURE 9.1 – Moyennes d’ICEL sur les deux simulateurs : (a) ICEL en ligne droite pendant la conduite de familiarisation ; (b) ICEL en ligne droite pendant la conduite de test ; (c) ICEL en courbe pendant la conduite de familiarisation ; (d) ICEL en courbe pendant la conduite de test. Les barres d’erreur représentent les erreurs types.

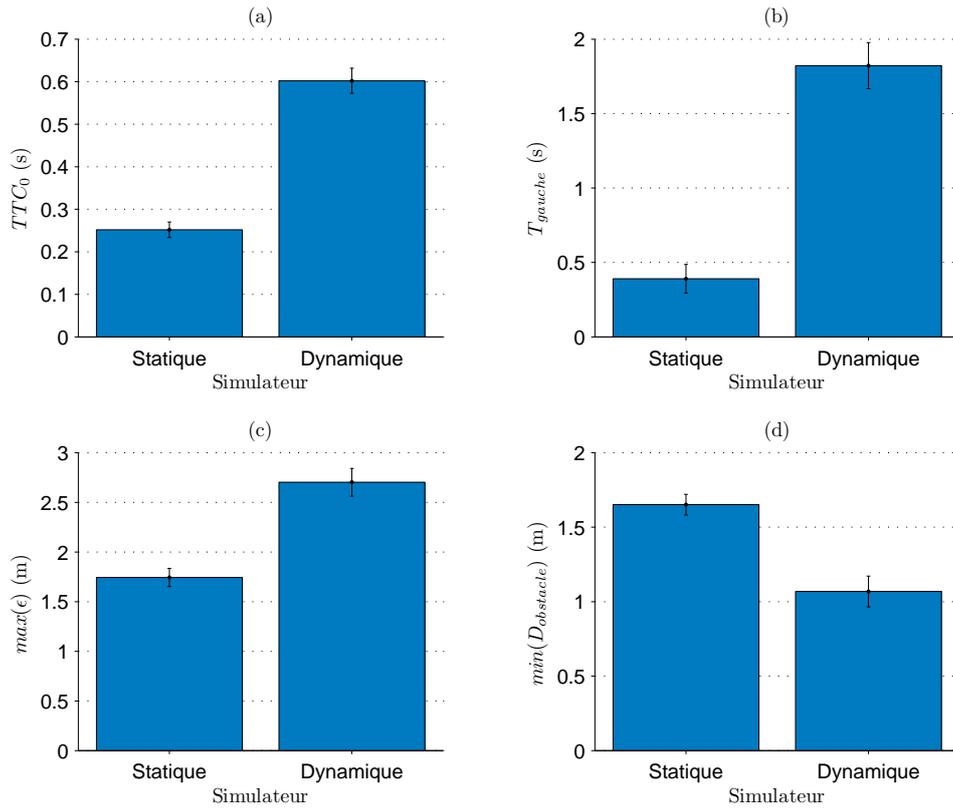


FIGURE 9.2 – Moyennes par simulateur : (a) *time-to-collision* au début de la manœuvre d'évitement ; (b) temps passé sur la voie de gauche ; (c) écart latéral maximum ; (d) distance minimale à l'obstacle. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Accélération latérale

La figure 9.3 présente les moyennes d'accélération latérale maximale, lors de la prise de virage normale et lors de la situation d'urgence, pour les deux simulateurs.

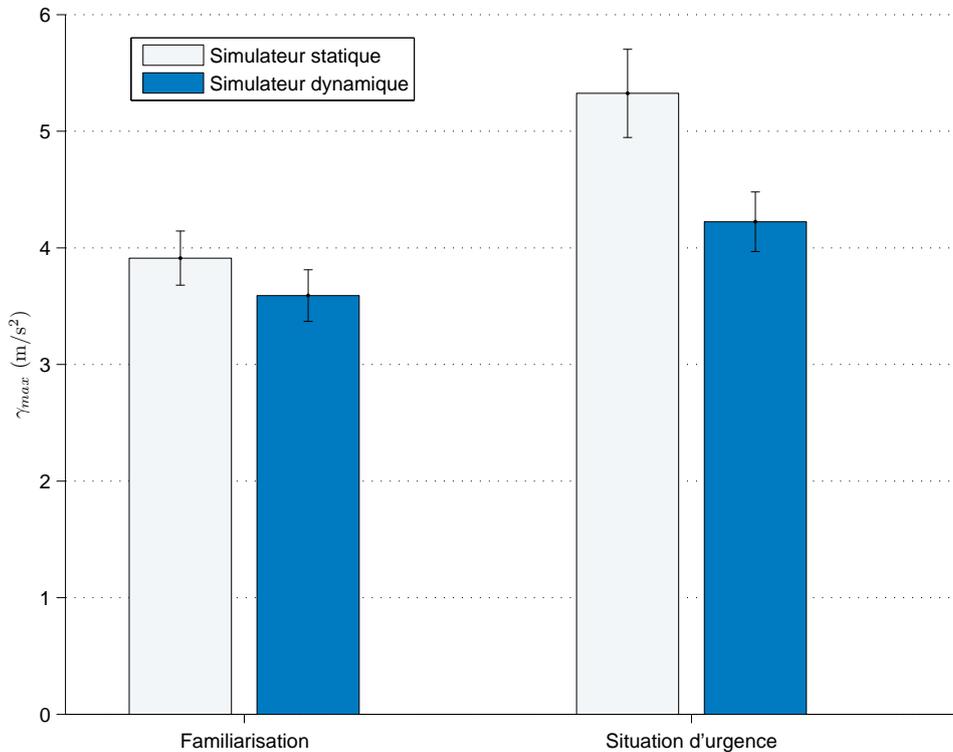


FIGURE 9.3 – Moyennes d'accélération latérale maximale γ_{max} , lors des deux conduites et sur les deux simulateurs. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Les tests de Mann-Whitney réalisés sur l'accélération latérale maximale ne montrent aucune différence significative entre les deux simulateurs lors de la conduite de familiarisation ($U(27, 32) = 354; Z = -1.19; p = 0.24$), mais une accélération significativement plus grande sur simulateur statique que sur simulateur dynamique lors de la situation d'urgence ($U(27, 32) = 279; Z = -2.33; p < 0.02$).

La figure 9.4 présente les moyennes de vitesse associée à l'accélération latérale maximale, lors de la prise de virage normale et lors de la situation d'urgence, pour les deux simulateurs.

L'ANOVA à mesure répétées réalisée sur la vitesse associée montre un effet significatif du type de simulateur ($F(1, 57) = 13.39; p < 0.001$), un effet significatif du type de conduite ($F(1, 57) = 37.49; p < 0.001$), ainsi qu'un effet d'interaction entre ces deux facteurs ($F(1, 57) = 5.91; p < 0.02$) sur cet indicateur.

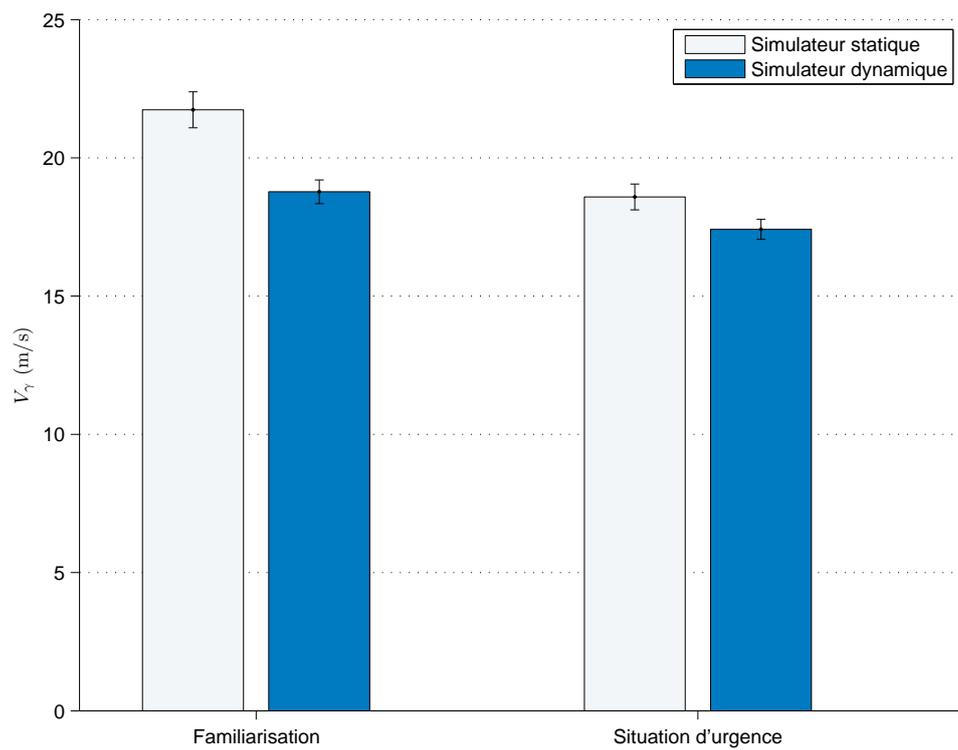


FIGURE 9.4 – Moyennes de vitesse associée à l'accélération latérale maximale V_γ , lors des deux conduites et sur les deux simulateurs. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

9.3.3 Questionnaire

La figure 9.5 présente les moyennes des scores d'utilité et de satisfaction, pour les deux questionnaires et pour les deux simulateurs.

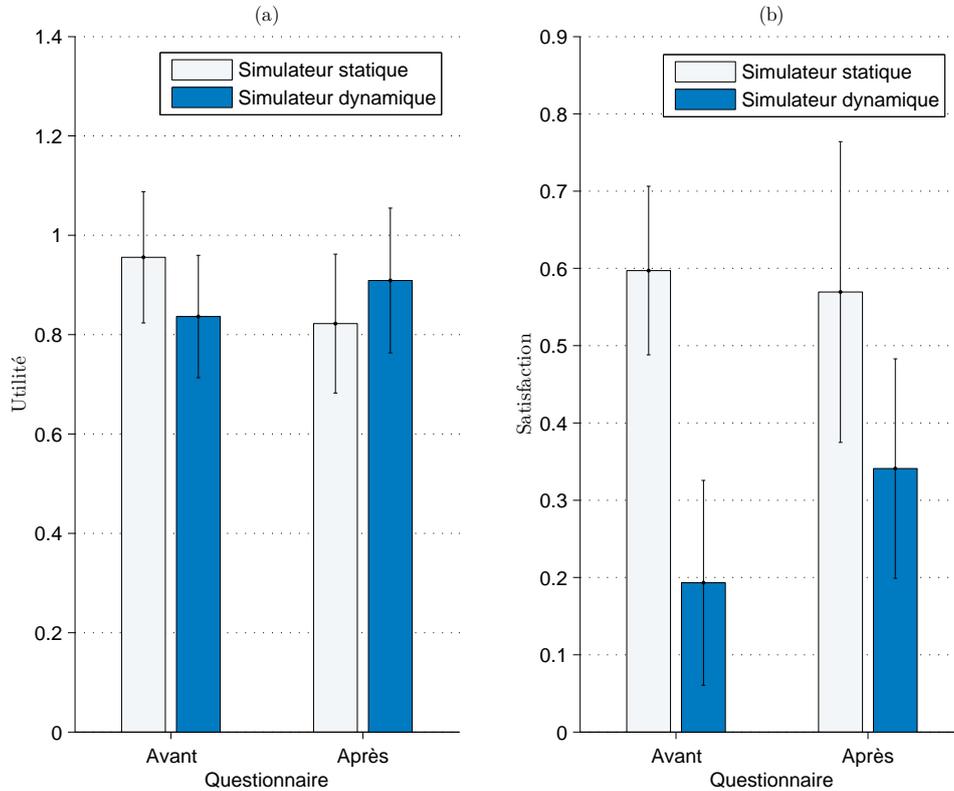


FIGURE 9.5 – Réponses aux questionnaires pour les deux simulateurs : (a) utilité ; (b) satisfaction. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Les analyses montrent, pour le questionnaire “avant”, un score de satisfaction significativement plus élevé sur simulateur statique ($U = 118.5; Z = 2.16; p = 0.03$). En revanche, le score d'utilité ne montre pas de différence significative ($t(38) = 0.66; p = 0.51$). Il en va de même pour les scores du questionnaire “après” d'utilité ($t(38) = -0.42; p = 0.67$) et de satisfaction ($t(38) = 0.97; p = 0.34$).

9.3.4 Tâche secondaire

La figure 9.6 présente les résultats de la tâche secondaire, sur les deux simulateurs.

Les analyses ne montrent aucune différence significative entre les deux simulateurs que ce soit

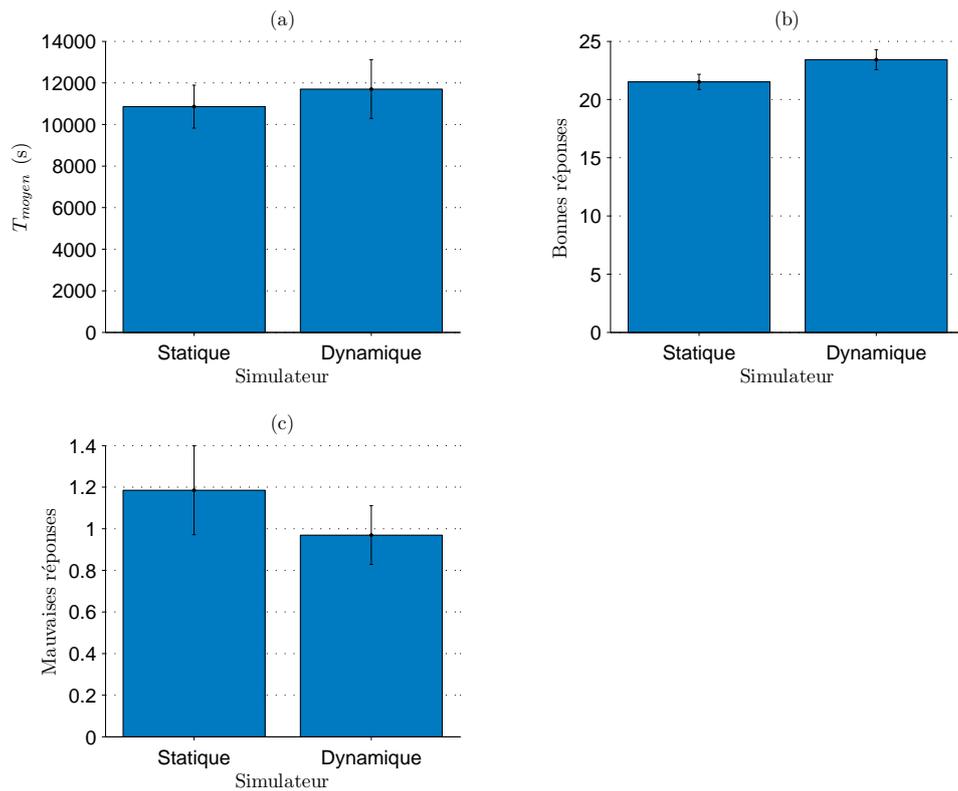


FIGURE 9.6 – Résultats de la tâche secondaire pour les deux simulateurs : (a) temps moyen de réponse à une tâche, (b) nombre de bonnes réponses, (c) nombre de mauvaises réponses. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

pour le temps moyen de réponses ($U = 443; Z = -0.04; p = 0.97$), le nombre de bonnes réponses ($U = 315; Z = -1.94; p = 0.05$), ou le nombre de mauvaises réponses ($U = 409.5; Z = 0.53; p = 0.59$).

9.4 Discussion

9.4.1 Conduite normale

Les données recueillies pendant les deux expérimentations ont montré une tendance générale à présenter des valeurs d'ICEL plus faible sur simulateur dynamique que sur simulateur statique (néanmoins cet écart n'était significatif que pour la conduite en ligne droite lors de la conduite de familiarisation). Cela montre que les conducteurs ont eu plus de facilité à maintenir leur position sur leur voie en présence de la restitution de mouvement. En effet, ces mouvements permettant aux conducteurs une meilleure perception de leurs déviations latérales (McLane et Wierwille, 1975), il leur était ainsi plus facile (avec notamment moins de délai) de corriger leur trajectoire en se replaçant au centre de la voie.

Des deux expérimentations, celle réalisée sur simulateur dynamique montre sur l'ICEL un apport moindre des système d'aide au contrôle latéral. En effet, lors de cette expérimentation, seule l'efficacité du LKA, qui présentait le niveau d'automatisation le plus élevé, a été prouvée. Lors de l'expérimentation sur simulateur statique en revanche, le LDW aussi bien que le LKA s'étaient montrés efficaces.

Comme montré précédemment, la conduite sur simulateur dynamique a montré chez les sujets un meilleur suivi de trajectoire dès la conduite de familiarisation, c'est-à-dire avant l'introduction de systèmes d'aide à la conduite. Etant donné ces résultats, nous pensons donc que l'amélioration du contrôle latéral introduite par l'ajout de restitution de mouvements tendrait à atténuer l'efficacité observée des systèmes d'aide au contrôle latéral.

9.4.2 Situation d'urgence

Sur les deux simulateurs, le taux d'accident lors de la situation d'urgence est resté très faible : un sujet de chaque expérimentation a eu un accident. Il s'agissait d'un sujet utilisant le LKA dans les deux cas. Cependant, ces cas isolés n'étaient pas suffisants pour avoir une augmentation significative du taux d'accident avec ce système d'aide.

Les circonstances de l'accident étaient différentes pour ces deux sujets. Le sujet de l'expérimentation statique a réussi à éviter le camion, mais a ensuite perdu le contrôle du véhicule en cherchant à revenir sur la voie de droite, puis est sorti de la route. Le sujet de l'expérimentation dynamique n'a en revanche pas réussi à éviter le camion, et est rentré en collision avec celui-ci. Dans

le premier cas, la cause est vraisemblablement une vitesse excessive, alors que le deuxième cas traduirait plutôt une réaction inappropriée, qu'elle ait été trop tardive ou bien trop faible.

Indicateurs globaux

Nous avons observé sur simulateur dynamique, par rapport au simulateur statique, une augmentation du *time-to-collision* au début de la manœuvre d'évitement, une augmentation du temps passé sur la voie de gauche, une augmentation de l'écart latéral maximum et une diminution de la distance minimale à l'obstacle, par rapport à l'expérimentation sur simulateur statique.

Ces phénomènes ne sont cependant pas à mettre uniquement sur le compte de la différence entre les deux simulateurs. En effet, pour l'expérimentation sur simulateur dynamique, la situation d'urgence a été modifiée (voir 8.2.3) : le camion à éviter était situé plus près du centre de la route. Ces résultats confirment donc le caractère plus critique de cette situation d'urgence, qui imposait alors une manœuvre d'évitement plus ample, ainsi qu'une marge de sécurité réduite. Concernant l'augmentation du *time-to-collision* au début de la manœuvre d'évitement, elle s'explique vraisemblablement par le fait que, le camion étant masqué par une rangée d'arbre mais plus proche du centre de la route, les sujets ont pu le voir légèrement plus tôt que lors de l'expérimentation sur simulateur statique.

Décomposition de la manœuvre d'évitement

Lors des deux expérimentations, les manœuvres d'évitement effectuées par les sujets présentent les mêmes caractéristiques. En ce qui concerne le contrôle latéral, elles peuvent être décomposées selon la même séquence : tout d'abord un coup de volant rapide vers la gauche, puis un contrebraquage pour revenir vers la voie de droite, puis une stabilisation autour de la position centrale du volant afin de continuer la conduite. Seuls quelques sujets de l'expérimentation sur simulateur dynamique ont montré une courte stabilisation lors du pic d'angle volant vers la gauche, avant de contrebraquer. Ce comportement découle vraisemblablement de la modification de la situation d'urgence et avait pour but d'effectuer un écart vers la voie de gauche de plus grande amplitude.

En revanche, les premières tendances observées sur le comportement au volant lors des différentes phases identifiées de la manœuvre d'évitement, n'ont pas été confirmées sur simulateur dynamique. En effet, les relations liant les estimateurs de la criticité de la situation à différents instants avec la réponse au volant des conducteurs, observées sur les données de l'expérimentation statique, n'étaient pas significatives sur les données de l'expérimentation dynamique. Nous pensons que cela signifie que sur simulateur statique, les sujets ont principalement utilisé des indices visuels (tels que l'angle de l'obstacle ou le *time-to-line-crossing*, utilisés lors de ces analyses par phase) et ont réagi principalement à l'aide du volant, alors que sur simulateur dynamique, les sujets ont également utilisé des indices vestibulaires, et le contrôle longitudinal a joué un rôle important dans la réussite de l'évitement. En particulier, nous pensons que les accélérations la-

térales perçues par les conducteurs leur ont permis d'adapter leur vitesse (Reymond et al., 2001; Correia Grácio et al., 2011). De ce fait, l'importance relative du contrôle latéral dans l'évitement de l'obstacle s'est trouvée diminuée.

Accélération latérale

Les analyses décrites dans les deux chapitres précédents ont cherché à évaluer l'évolution de l'accélération latérale maximale, ainsi que de la vitesse associée, pendant la manœuvre d'évitement d'obstacle, par rapport à une prise de virage normale. Les résultats ont montré une augmentation de l'accélération latérale maximale uniquement sur le simulateur statique, mais une diminution de la vitesse associée sur les deux simulateurs.

Dans ce chapitre, la comparaison des données issues des deux expérimentations a montré, lors de la situation d'urgence, une accélération latérale maximale significativement plus grande sur simulateur statique que sur simulateur dynamique.

La vitesse associée à cette accélération latérale maximale était significativement plus faible pendant la situation d'urgence que pendant la conduite normale, et également significativement plus importante sur simulateur statique que sur simulateur dynamique. De plus, un effet significatif d'interaction suggère que la réduction de vitesse appliquée lors de la situation d'urgence était plus importante sur simulateur statique que sur simulateur dynamique.

Ces résultats vont à l'encontre de ce que nous avons prédit car, la situation d'urgence étant légèrement plus critique lors de l'expérimentation sur simulateur dynamique (voir 8.2.3), la manœuvre à réaliser pour éviter le camion était de plus grande amplitude. Il était alors attendu que l'accélération latérale lors de l'évitement serait plus importante sur simulateur dynamique. Or, le contraire a été observé.

Néanmoins, cette observation étend l'hypothèse de Reymond et al. (2001) à une situation d'urgence. En effet, selon les auteurs, l'accélération latérale est un indice primordial utilisé par les conducteurs lors de la prise de virage, et contrôlé grâce à une réduction de la vitesse. Nos résultats montrent que ce phénomène est également observable lors d'une situation d'urgence modérée. En effet, les conducteurs ont réussi, sur simulateur dynamique, à limiter l'accélération latérale maximale à celle atteinte lors d'une prise de virage normale, en réduisant leur vitesse. En revanche, sur simulateur statique et malgré une réduction de leur vitesse plus importante, les conducteurs ont atteint une accélération latérale maximale largement supérieure à celle observée lors d'une prise de virage normale.

L'accélération latérale apparaît donc comme une information primordiale pour une telle manœuvre d'urgence, mais dont la perception basée uniquement sur des indices visuels semble assez mauvaise (Correia Grácio et al., 2011). Nous pensons donc qu'en l'absence d'une perception correcte de l'accélération latérale comme cela est le cas sur simulateur statique, les sujets ont réagi de manière exagérée, produisant ainsi une accélération latérale plus grande que celle qu'ils

produiraient dans la réalité.

9.4.3 Questionnaire

Les analyses des deux chapitres précédents ont montré, sur simulateur statique, que les sujets ont donné un score d'utilité significativement plus élevé au système LDW qu'au système LKA, après l'avoir testé en conduite. Sur simulateur dynamique, ce résultat n'a pas été retrouvé. En revanche, les sujets utilisant le LDW ont significativement augmenté leur score d'utilité entre les deux questionnaires, ce qui n'était pas le cas des sujets utilisant le LKA.

Conformément aux résultats attendus, les réponses aux questionnaires montrent très peu de différences entre les deux simulateurs, les systèmes d'aide utilisés dans les deux cas étant identiques. Cela montre pour le questionnaire présenté après la conduite que les sujets ont réussi, comme il leur était demandé, à évaluer le système d'aide en lui-même, en faisant abstraction des performances et du niveau de réalisme du simulateur.

Seul le score de satisfaction, avant la conduite avec système d'aide, se montre plus élevé sur simulateur statique. Cette différence pourrait traduire une certaine appréhension des sujets quant à l'utilisation d'un système d'aide sur le simulateur dynamique. En effet, la conduite étant plus complexe et plus réaliste que sur un simulateur statique, elle demande également plus d'attention. Les sujets pourraient alors avoir craint que cela ne les perturbe et altère donc leur performance de conduite. En effet, même si cette appréhension ne se retrouve pas dans le questionnaire à la fin de la conduite, plusieurs sujets ont reporté avoir apprécié l'expérience mais être sceptique sur l'utilisation d'un tel système dans un véhicule réel.

9.4.4 Tâche secondaire

Tout comme l'ont montré les analyses par groupe, celles réalisées ici par simulateur n'ont montré aucune différence significative sur les performances à la tâche secondaire. Le niveau de distraction induit par la tâche secondaire semble donc avoir été équivalent, quel que soit le système d'aide et quel que soit le simulateur. La restitution de mouvements, aussi bien que les systèmes d'aide, semble donc n'avoir eu aucun impact sur la charge mentale des conducteurs (Sanders, 1979; de Waard, 1996).

9.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en parallèle les résultats des deux expérimentations présentées dans les chapitres précédents, afin de discuter des apports de la restitution de mouvement pour ce type d'études.

Les analyses ont montré que les conducteurs adoptaient un meilleur contrôle latéral sur simulateur dynamique, en conduisant plus près du centre de la voie. Par conséquent, les bénéfices d'un système d'aide au contrôle latéral se trouvent ainsi atténués. L'expérimentation sur simulateur dynamique n'a en effet montré une réelle efficacité que pour le système d'aide possédant le niveau d'automatisation le plus élevé. Ces résultats incitent donc, pour les études à venir, à être particulièrement prudent vis à vis des observations réalisées sur un simulateur à faible niveau de réalisme, notamment un simulateur statique.

L'analyse de la manœuvre d'évitement lors des deux expérimentations a confirmé le caractère plus critique de la situation d'urgence modifiée lors de l'expérimentation dynamique. En effet, les sujets sur simulateur dynamique ont effectué une manœuvre d'évitement plus large. Cependant, ils ont aussi bien réussi que les sujets de l'expérimentation statique à garder le contrôle du véhicule.

Les résultats montrent que lors de l'expérimentation sur simulateur statique, les sujets ont eu une mauvaise perception de l'accélération latérale. Ils ont alors effectué un dépassement brutal en atteignant des niveaux d'accélération latérale élevés. En revanche, les sujets de l'expérimentation sur simulateur dynamique ont réussi à maintenir leur accélération latérale au même niveau que lors d'une prise de virage, grâce à une réduction de leur vitesse, permettant ainsi un évitement plus souple et confortable.

Ces résultats mettent en relief l'importance de la restitution de mouvement pour étudier le comportement des conducteurs dans ce type de situation d'urgence, et incite à prendre les résultats observés en l'absence de mouvement avec beaucoup de précaution. Des études sur véhicules réels seraient également nécessaires afin de valider les comportements observés sur simulateur dynamique.