



HAL
open science

Perception et contrôle de la distance intervéhiculaire en condition de brouillard : Etude sur simulateur

Stéphane Caro

► **To cite this version:**

Stéphane Caro. Perception et contrôle de la distance intervéhiculaire en condition de brouillard : Etude sur simulateur. Modélisation et simulation. Université Pierre Mendès-France - Grenoble II, 2008. Français. NNT: . tel-00544889

HAL Id: tel-00544889

<https://theses.hal.science/tel-00544889>

Submitted on 16 Dec 2010

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

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

Université Pierre Mendès France, Grenoble 2

Laboratoire de Psychologie de la Conduite (INRETS, Arcueil)

Laboratoire de Psychologie et de NeuroCognition, CNRS (UMR 5105)

THÈSE

Pour l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE 2

Mention : Psychologie Cognitive

Présentée et soutenue publiquement

Le 12 Novembre 2008

par **Stéphane CARO**

Perception et contrôle de la distance intervéhiculaire en condition de brouillard : Etude sur simulateur

Membres du jury

| | | |
|--------------------|--|---------------------|
| Viola Cavallo | Directeur de Recherche (INRETS) | Directrice de thèse |
| Jeanny Hérault | Professeur (UMR 5216 CNRS / Univ. Grenoble 1) | Examineur |
| Andras Kemeny | Docteur d'état ès Sciences (Renault S.A.) | Examineur |
| Christian Marendaz | Professeur (UMR 5105 CNRS / UPMF Grenoble) | Directeur de thèse |
| Daniel Mestre | Directeur de Recherche (UMR 6233 CNRS / Univ. Aix-Marseille 2) | Rapporteur |
| Corinne Roumes | Professeur du Val de Grâce (IMASSA) | Rapporteur |

A ma famille,

Remerciements

Je remercie tout particulièrement

Viola Cavallo, pour avoir dirigé ce travail, pour m'avoir fait découvrir le monde de la recherche et celui de la psychologie perceptive. Je la remercie en particulier pour son investissement.

Christian Marendaz, pour avoir accepté d'être mon directeur de thèse, pour son ouverture face à un domaine qui n'était pas le sien, et pour ses conseils éclairés. Je le remercie également pour avoir su être présent malgré la distance, à chaque fois que j'ai eu besoin de son aide.

Erwin Boer, pour son aide précieuse dans le traitement des données, pour son expertise dans le domaine de la conduite, et pour ses idées originales.

Les membres du jury, qui me font l'honneur d'examiner mon travail. Merci à Corinne Roumes et Daniel Mestre qui ont accepté d'être rapporteurs, ainsi qu'à Jeanny Hérault et Andras Kemeny.

L'INRETS qui a financé cette thèse durant trois années et qui m'a ainsi permis de la réaliser dans de bonnes conditions. Gilles Malaterre, pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire ainsi que Patricia Delhomme qui a rendu possible le financement des expérimentations et qui m'a permis de finir cette thèse au sein de l'INRETS.

L'équipe MSIS, pour la mise à disposition du simulateur de conduite, et notamment Stéphane Espié, Pierre Gauriat, Jacky Robouant, et Isabelle Aillerie pour leur aide lors de la mise au point des expérimentations. Et bien sûr Fabrice Vienne, pour son aide répétée, son talent, et sa bonne humeur !

Mes collègues de l'INRETS et du LPC pour leur présence, ainsi que tous ceux qui y sont passé durant ma thèse. Je remercie en particulier ceux qui m'ont aidé à un moment ou à un autre, que ce soit pour des problèmes de relecture, de statistiques, de documentation, de mécanique, ou administratifs.

Les sujets d'expérimentation qui ont rendu ce travail possible, avec une pensée particulière à ceux qui ont souffert du simulateur. Un grand merci aussi à ceux de l'INRETS qui n'étaient pas rémunérés pour leur participation.

Je tiens enfin à exprimer toute mon affection,

A ma famille, pour leur soutien constant durant ces années de thèse et celles qui les ont précédées.

A Anne-Claire, pour sa gentillesse et sa compréhension.

A mes amis, pour leurs encouragements, et en particulier à ceux que j'ai délaissés pour cause de travail.

Résumé

Les statistiques mettent en évidence une augmentation importante du risque et de la gravité des accidents par temps de brouillard. Par ailleurs, les études de trafic menées sur autoroute montrent généralement une réduction des intervalles par temps de brouillard et indiquent que cette réduction ne peut pas être expliquée uniquement par la nécessité de garder le contact visuel avec le véhicule lièvre. Partant de ce constat, nous avons cherché à mieux comprendre les causes de la diminution des intervalles par temps de brouillard. Nous avons testé trois hypothèses selon lesquelles le brouillard affecte les mécanismes perceptifs et perceptivo-moteurs impliqués dans la régulation de l'intervalle et dans le contrôle de la trajectoire.

La première hypothèse est celle d'une surestimation de la distance intervéhiculaire en condition de brouillard. Les travaux antérieurs ayant montré une surestimation importante de la distance intervéhiculaire en condition de brouillard très dense, nous avons cherché à préciser les conditions d'apparition de ce phénomène à travers deux expérimentations de jugement perceptif. Nos résultats montrent que la surestimation se limite aux conditions de brouillard extrêmement dense où très peu d'indices de distance sont disponibles. La réduction des intervalles par temps de brouillard ne peut donc pas être expliquée par une surestimation de la distance intervéhiculaire.

La seconde hypothèse étudiée concerne la sensibilité au mouvement relatif (i.e., l'éloignement ou le rapprochement du véhicule lièvre). Nous supposons (i) qu'en réduisant le contraste du véhicule lièvre ou en masquant sa silhouette, le brouillard rend la perception du mouvement relatif plus difficile et (ii) que les conducteurs réduisent leur intervalle de façon à maintenir le seuil de perception du mouvement relatif au même niveau qu'en condition de visibilité normale. Au cours de deux expérimentations, nous avons mesuré le seuil de perception du mouvement relatif sous la forme d'un temps de réponse. Les résultats confirment le volet perceptif de notre hypothèse et montrent plus particulièrement que la sensibilité au mouvement relatif est largement dégradée lorsque les informations fournies par la silhouette du véhicule lièvre ne sont pas disponibles. Afin de tester le second volet de notre hypothèse portant sur les mécanismes du contrôle de l'intervalle, nous avons mené une expérience de suivi de véhicule où la tâche de contrôle de l'intervalle était rendue difficile par les variations de vitesse du véhicule lièvre. Les participants ont adopté différentes stratégies, dont l'une visant à se rapprocher du véhicule lièvre de façon à voir correctement sa silhouette et à augmenter ainsi la sensibilité au mouvement relatif, ce qui confirme le second volet de notre hypothèse.

Pour finir, nous avons cherché à savoir si les exigences liées à la tâche de contrôle de la trajectoire sont en cause dans l'adoption d'intervalles courts par temps de brouillard. La littérature laisse en effet supposer que le suivi d'un véhicule lièvre de près facilite le contrôle de trajectoire en condition de brouillard, tout en évitant les erreurs de positionnement latéral. L'expérience de suivi de véhicule que nous avons menée, où les exigences du contrôle de directionnel étaient importantes, n'a pas confirmé cette hypothèse. Il n'est en effet apparu aucun bénéfice perceptivo-moteur à suivre le véhicule lièvre de près en condition de brouillard. Nous constatons néanmoins que le véhicule lièvre est utilisé comme guide en condition de brouillard.

L'ensemble des résultats suggère que l'adaptation des conducteurs face à la réduction de la sensibilité au mouvement relatif due au brouillard contribue à la diminution des intervalles par temps de brouillard. Nous proposons des perspectives d'applications basées sur cette interprétation.

Mots clés : Brouillard Suivi de véhicule
Distance intervéhiculaire Temps intervéhiculaire
Perception de la distance intervéhiculaire Perception du mouvement relatif
Contrôle de l'intervalle Contrôle de la trajectoire

Abstract

Statistics show a great increase in accident risk and fatalities in fog. Moreover, traffic studies generally show that temporal headway is reduced in foggy conditions and point out that this headway reduction can't be explained solely by the need to keep the lead vehicle in sight. Based on these observations, our objective was to better understand close following in fog. Three hypotheses were tested, which are linked to perceptual and perceptual-motor mechanisms involved in headway control and trajectory control.

We first focused on the hypothesis of distance overestimation in fog. Since previous works showed a great overestimation in very thick fog, we carried out two experiments in order to determine more precisely in which conditions distance headways are actually overestimated. The results showed that overestimation was limited to extremely dense fog conditions, where very few distance cues were available. Thus, headway reduction in fog can't be explained by a distance overestimation.

The second hypothesis is related to relative motion sensitivity (i.e., increase or decrease in headway). We hypothesized that (i) by reducing the lead vehicle's contrast or masking its outlines, fog makes the relative motion perception more difficult, and that (ii) drivers reduce headway so as to maintain the relative motion perception threshold at the same level as in clear weather condition. In two experiments, the relative motion perception threshold has been measured in terms of choice response time. The results are in line with our hypothesis' first point (perceptual aspect), and more specifically show that the relative motion sensitivity is much lower when the information provided by the vehicle outline is not available. In order to test the hypothesis' second point (headway control mechanisms), a car following experiment has been carried out, where the lead vehicle's speed variations increased the demand of the headway-control task. Subjects adopted different strategies, one of which consisted in a headway reduction so as to clearly see the outline of the lead vehicle and thus increase the relative motion sensitivity. This finding is in line with the hypothesis' second point.

Finally, our aim was to find out whether the demand of the trajectory-control task is involved in close following in fog. Literature suggests that following a lead vehicle with a short headway make trajectory-control easier in foggy conditions, while limiting lateral position errors. The car following experiment we carried out, with a high trajectory-control task demand, has not confirmed this hypothesis, insofar as close following in fog did not bring any perceptual-control benefit. Nevertheless, the results show that the lead vehicle was used as a guide in foggy conditions.

The results suggest that drivers' adaptation to the lowering of relative motion sensitivity due to fog contributes to headway reduction in fog. Possible applications based on this interpretation are discussed.

Keywords: Fog
Distance headway
Distance headway perception
Headway control
Car following
Temporal headway
Relative motion perception
Lateral trajectory control

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| TABLE DES MATIERES | 1 |
| LEXIQUE DES SIGLES | 7 |
| GLOSSAIRE | 9 |
| PROBLEMATIQUE GENERALE | 11 |
| CHAPITRE 1 : INTRODUCTION | 15 |
| 1 ACCIDENTOLOGIE ET BROUILLARD | 15 |
| 2 COMPORTEMENT OBSERVE PAR TEMPS DE BROUILLARD | 16 |
| 2.1 VITESSES | 16 |
| 2.2 INTERVALLES | 17 |
| 3 LIEN ENTRE INTERVALLES COURTS ET COLLISIONS ARRIERE ? | 19 |
| 4 LE SUIVI DE VEHICULE | 20 |
| 5 LES EFFETS VISUELS DU BROUILLARD | 22 |
| 5.1 LES CAUSES DU BROUILLARD ET SES EFFETS VISUELS | 22 |
| 5.2 CONTRASTE ET DISTANCE DE VISIBILITE DES OBJETS | 23 |
| 5.2.1 Loi de Koschmieder | 23 |
| 5.2.2 Loi d'Allard | 24 |
| 6 PLAN DE LECTURE | 27 |
| CHAPITRE 2 : ESTIMATION DE LA DISTANCE INTERVEHICULAIRE | 31 |
| 7 INTRODUCTION | 31 |
| 7.1 ROLE DE L'INTERDISTANCE PERÇUE EN SITUATION DE SUIVI DE VEHICULE | 31 |
| 7.2 PERCEPTION DE LA DISTANCE EGOCENTREE | 32 |
| 7.2.1 Informations de distance | 32 |
| 7.2.2 Fusion des informations de distance | 35 |
| 7.2.3 Autres théories concernant la perception des distances | 37 |
| 7.3 PERCEPTION DE L'INTERDISTANCE ET BROUILLARD | 38 |
| 7.3.1 Influence du brouillard sur les informations de distance | 38 |
| 7.3.2 Expériences réalisées antérieurement | 40 |
| 7.3.3 Différences méthodologiques des expériences aux résultats contradictoires | 41 |
| 7.4 HYPOTHESES | 45 |
| 8 EXPERIENCE 1 | 46 |
| 8.1 METHODE | 46 |
| 8.1.1 Participants..... | 46 |
| 8.1.2 Matériel..... | 47 |
| 8.1.3 Conditions expérimentales..... | 47 |
| 8.1.4 Tâche..... | 51 |
| 8.1.5 Procédure | 51 |
| 8.2 RESULTATS DE L'EXPERIENCE 1 | 52 |
| 8.2.1 Analyse portant sur les essais réalisés en condition de brouillard | 52 |
| 8.2.2 Analyse incluant les trois conditions de visibilité..... | 57 |

Table des matières

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 8.2.3 | Analyse portant sur les essais en condition de visibilité normale | 60 |
| 8.2.4 | Ampleur de la surestimation | 61 |
| 8.3 | DISCUSSION CONCERNANT L'EXPERIENCE 1 | 62 |
| 8.3.1 | Influence du brouillard sur les distances estimées | 62 |
| 8.3.2 | Explication des résultats contradictoires ? | 64 |
| 8.3.3 | Position des feux de brouillard..... | 66 |
| 9 | EXPERIENCE 2..... | 69 |
| 9.1 | METHODE..... | 69 |
| 9.1.1 | Conditions expérimentales..... | 69 |
| 9.1.2 | Procédure | 71 |
| 9.2 | RESULTATS DE L'EXPERIENCE 2 | 72 |
| 9.3 | DISCUSSION CONCERNANT L'EXPERIENCE 2 | 75 |
| 9.3.1 | Effets observés | 75 |
| 9.3.2 | Différences méthodologiques avec les expériences antérieures | 77 |
| 10 | DISCUSSION CONCERNANT L'ESTIMATION DE LA DISTANCE INTERVEHICULAIRE..... | 78 |
| 10.1 | ESTIMATION DES DISTANCES | 78 |
| 10.2 | ESTIMATION DE L'INTERDISTANCE EN CONDITION DE BROUILLARD..... | 79 |
| 10.3 | AUTRES INTERPRETATIONS | 80 |
| 10.4 | CONSEQUENCES EN TERMES DE SECURITE ROUTIERE..... | 80 |

CHAPITRE 3 : SEUIL DE PERCEPTION DU MOUVEMENT RELATIF 83

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | INTRODUCTION | 83 |
| 1.1 | MECANISMES DE PERCEPTION DU MOUVEMENT | 83 |
| 1.1.1 | Trois niveaux de perception..... | 83 |
| 1.1.2 | Mécanismes de perception du mouvement | 84 |
| 1.1.3 | Travaux antérieurs..... | 86 |
| 1.1.4 | Mécanismes cognitifs..... | 88 |
| 1.2 | INFLUENCE DU BROUILLARD ? | 89 |
| 1.3 | HYPOTHESES | 90 |
| 2 | EXPERIMENTATION 1 | 91 |
| 2.1 | METHODE..... | 91 |
| 2.1.1 | Participants..... | 91 |
| 2.1.2 | Matériel..... | 91 |
| 2.1.3 | Conditions expérimentales..... | 94 |
| 2.1.4 | Tâche..... | 95 |
| 2.1.5 | Procédure | 95 |
| 2.2 | RESULTATS..... | 96 |
| 2.2.1 | Effets principaux | 97 |
| 2.2.2 | Interactions..... | 98 |
| 2.2.3 | Interactions triples..... | 101 |
| 2.2.4 | Recherche d'un invariant..... | 104 |
| 2.2.5 | Calcul de la variation du contraste..... | 106 |
| 2.3 | DISCUSSION CONCERNANT LES RESULTATS DE L'EXPERIMENTATION 1 | 107 |
| 2.3.1 | Interprétation des résultats en termes perceptifs | 107 |
| 2.3.2 | Implications sur la régulation de l'intervalle..... | 110 |
| 3 | EXPERIMENTATION 2 | 112 |
| 3.1 | METHODE..... | 112 |
| 3.2 | RESULTATS..... | 113 |
| 3.3 | DISCUSSION CONCERNANT LES RESULTATS DE L'EXPERIMENTATION 2 | 115 |
| 3.3.1 | Interprétation des résultats | 115 |
| 3.3.2 | Calcul du gain de temps de réponse associé à une réduction de l'intervalle | 118 |
| 4 | DISCUSSION CONCERNANT LE SEUIL DE PERCEPTION DU MOUVEMENT RELATIF..... | 120 |

| | |
|---|------------|
| CHAPITRE 4 : LE CONTROLE DE L'INTERVALLE..... | 123 |
| 1 INTRODUCTION | 123 |
| 1.1 MODELES DE SUIVI DE VEHICULES..... | 123 |
| 1.2 MODELES BASES SUR DES SEUILS PERCEPTIFS..... | 124 |
| 1.3 MODELES BASES SUR LES ECARTS PAR RAPPORT A UNE SITUATION DE REFERENCE | 125 |
| 1.4 PHENOMENES NON PRIS EN COMPTE PAR LES MODELES | 127 |
| 1.5 CONTRAINTES ET STRATEGIES LIEES AU BROUILLARD | 129 |
| 1.6 LE SEUIL DE PERCEPTION DU MOUVEMENT RELATIF..... | 131 |
| 1.7 HYPOTHESES | 132 |
| 2 METHODE..... | 133 |
| 2.1 MATERIEL EXPERIMENTAL..... | 133 |
| 2.2 COMPORTEMENT DU VEHICULE LIEVRE..... | 134 |
| 2.3 VISIBILITE DES FEUX DE BROUILLARD DU VEHICULE LIEVRE | 135 |
| 2.4 PARTICIPANTS | 136 |
| 2.5 TACHE | 137 |
| 2.6 VARIABLES..... | 137 |
| 2.7 PROCEDURE..... | 139 |
| 3 RESULTATS..... | 141 |
| 3.1 PRECISION DU CONTROLE DE L'INTERVALLE..... | 141 |
| 3.1.1 Ecart type de l'interdistance | 142 |
| 3.1.2 Discussion concernant la précision du contrôle de l'intervalle | 143 |
| 3.2 CHARGE MENTALE ALLOUEE AU CONTROLE DE L'INTERVALLE..... | 144 |
| 3.2.1 Mise au point du Pedal Reversal Rate..... | 145 |
| 3.2.2 Résultats concernant le Pedal Reversal Rate | 147 |
| 3.2.3 Amplitude maximale des mouvements de pédales | 150 |
| 3.2.4 Discussion concernant la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle | 154 |
| 3.3 INTERVALLE DE SUIVI | 155 |
| 3.3.1 Fonction de distribution de probabilité | 155 |
| 3.3.2 Intervalles pratiqués de façon individuelle | 156 |
| 3.3.3 Test d'une hypothèse spécifique..... | 158 |
| 3.3.4 Discussion concernant les intervalles de suivi..... | 161 |
| 4 DISCUSSION CONCERNANT LE CONTROLE DE L'INTERVALLE | 164 |
| 4.1 COMPARAISON DE NOS RESULTATS AVEC CEUX DE LA LITTERATURE | 164 |
| 4.2 PRINCIPAUX RESULTATS | 165 |
| CHAPITRE 5 : LE CONTROLE DE TRAJECTOIRE..... | 169 |
| 1 INTRODUCTION | 169 |
| 1.1 MODELES DE CONTROLE DE TRAJECTOIRE..... | 169 |
| 1.2 APPROCHE ECOLOGIQUE | 171 |
| 1.3 CHARGE MENTALE POUR LE CONTROLE DE TRAJECTOIRE | 173 |
| 1.4 RELATION ENTRE CHARGE MENTALE ET PERFORMANCE | 174 |
| 1.5 INFLUENCE DU BROUILLARD SUR LES MECANISMES DU CONTROLE DE TRAJECTOIRE..... | 176 |
| 1.6 CONTROLE DE TRAJECTOIRE, BROUILLARD, ET SUIVI DE VEHICULE..... | 177 |
| 1.7 AU-DELA DES MODELES, LES ASPECTS PRATIQUES | 178 |
| 1.8 HYPOTHESES | 179 |
| 2 METHODE..... | 180 |
| 2.1 GRANDES LIGNES DE LA METHODE | 180 |
| 2.2 ROUTE SINUEUSE..... | 181 |
| 2.3 VISIBILITE DU POINT TANGENT | 184 |
| 2.4 ACCELERATION LATERALE | 185 |
| 3 RESULTATS..... | 187 |
| 3.1 LE VEHICULE LIEVRE SERT-T-IL DE GUIDE ? | 187 |

Table des matières

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.1.1 | Méthode de calcul | 188 |
| 3.1.2 | Résultats concernant le décalage latéral en cours de virage..... | 191 |
| 3.1.3 | Discussion concernant le décalage latéral en cours de virage..... | 194 |
| 3.2 | LE STEERING WHEEL REVERSAL RATE COMME MESURE DE LA CHARGE MENTALE | 194 |
| 3.2.1 | Comparaison des deux méthodes | 196 |
| 3.2.2 | Choix d'un seuil..... | 196 |
| 3.3 | RESULTATS CONCERNANT LA CHARGE MENTALE POUR LE CONTROLE DE TRAJECTOIRE..... | 198 |
| 3.3.1 | Influence du brouillard..... | 198 |
| 3.3.2 | Influence de l'intervalle ? | 200 |
| 3.3.3 | Discussion concernant la charge mentale | 201 |
| 3.4 | MISE AU POINT DE MESURES DE LA PRECISION DU CONTROLE DE TRAJECTOIRE..... | 202 |
| 3.4.1 | Le Time to Line Crossing | 203 |
| 3.4.2 | Variabilité de la position latérale et du cap..... | 205 |
| 3.4.3 | Variabilité inter-virages | 207 |
| 3.4.4 | Variabilité de la position latérale en cours de virage | 208 |
| 3.5 | RESULTATS CONCERNANT LA PRECISION DU CONTROLE DE TRAJECTOIRE | 209 |
| 3.5.1 | Influence du brouillard..... | 209 |
| 3.5.2 | Influence de l'intervalle ? | 210 |
| 3.5.3 | Discussion concernant la précision du contrôle de trajectoire | 213 |
| 3.6 | INTERVALLE DE SUIVI : COMPARAISON BROUILLARD/TEMPS CLAIR..... | 216 |
| 3.6.1 | Discussion concernant l'intervalle de suivi | 218 |
| 4 | DISCUSSION CONCERNANT LE CONTROLE DE LA TRAJECTOIRE | 218 |
| 4.1 | PRINCIPAUX RESULTATS CONCERNANT LE CONTROLE DE LA TRAJECTOIRE | 218 |
| 4.2 | CONSEQUENCES SUR L'INTERVALLE ADOPTE..... | 219 |

CHAPITRE 6 : DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSIONS 221

| | | |
|----------|---|------------|
| 5 | POURQUOI DES INTERVALLES REDUITS EN TEMPS DE BROUILLARD ? | 221 |
| 5.1 | HYPOTHESE D'UNE SURESTIMATION DES INTERDISTANCES | 222 |
| 5.2 | HYPOTHESE D'UNE REDUCTION DE LA SENSIBILITE AU MOUVEMENT RELATIF | 224 |
| 5.3 | HYPOTHESE D'UNE COMPENSATION DE LA SENSIBILITE REDUITE AU MOUVEMENT RELATIF ... | 226 |
| 5.4 | EFFET DU CONTROLE DE LA TRAJECTOIRE SUR LE CHOIX DE L'INTERVALLE | 228 |
| 5.5 | EN RESUME..... | 229 |
| 6 | LIMITES | 230 |
| 6.1 | LES SITUATIONS EXPERIMENTALES ETUDIEES | 230 |
| 6.2 | SIMULATEUR DE CONDUITE | 231 |
| 7 | PERSPECTIVES | 232 |
| 7.1 | PROLONGEMENT DES PRESENTS TRAVAUX | 232 |
| 7.2 | ETUDE D'AUTRES VARIABLES PERCEPTIVES..... | 233 |
| 7.3 | DES INVESTIGATIONS ELARGIES A D'AUTRES APPROCHES | 234 |
| 7.4 | APPLICATIONS..... | 236 |

BIBLIOGRAPHIE 237

ANNEXES..... 257

| | | |
|-----------------|--|------------|
| ANNEXE 1 | FEUILLE D'INFORMATION, CONSIGNES, ET QUESTIONNAIRE POUR LES EXPERIENCES PRESENTEES DANS LE CHAPITRE 2 | 259 |
| ANNEXE 2 | CONTREBALANCEMENT POUR LES EXPERIENCES PRESENTEES DANS LE CHAPITRE 2 | 262 |
| ANNEXE 3 | FEUILLE D'INFORMATION, CONSIGNES, ET QUESTIONNAIRE POUR LES EXPERIENCES PRESENTEES DANS LE CHAPITRE 3 | 265 |

Table des matières

| | | |
|-----------------|--|------------|
| ANNEXE 4 | CONTREBALANCEMENT POUR LA PREMIERE EXPERIENCE PRESENTEE DANS LE CHAPITRE 3 | 268 |
| ANNEXE 5 | LIMITES DU SYSTEME D'AFFICHAGE VIS-A-VIS DES RESULTATS PRESENTES DANS LE CHAPITRE 3 | 270 |
| ANNEXE 6 | PROFIL DE VITESSE DU VEHICULE LIEVRE UTILISE POUR L'EXPERIENCE DECRITE DANS LES CHAPITRES 4 ET 5 | 272 |
| ANNEXE 7 | FEUILLE D'INFORMATION, CONSIGNES, ET QUESTIONNAIRE UTILISES POUR L'EXPERIENCE DECRITE DANS LES CHAPITRES 4 ET 5 | 277 |
| ANNEXE 8 | CONTREBALANCEMENT POUR L'EXPERIENCE DECRITE DANS LES CHAPITRES 4 ET 5 | 280 |

Lexique des sigles

- DVM : Distance de Visibilité Météorologique. Il s'agit d'une mesure de la densité du brouillard, et sa valeur correspond à la distance à laquelle un grand objet noir présenté sur fond clair peut être vu.
- JND : Just Noticeable Difference. Expression anglaise représentant le seuil différentiel.
- OpenGL : Open Graphics Library. Interface de programmation développée par Silicon Graphics. Elle contient une bibliothèque de fonctions graphiques qui permettent notamment la génération d'images en trois dimensions.
- PDF : Probability Distribution Function. Expression anglaise qui signifie la fonction de distribution de probabilité.
- PRR : Pedal Reversal Rate. Expression anglaise pour indiquer une mesure de la fréquence des actions du conducteur sur les pédales, dérivée d'une mesure plus communément utilisée : le Steering wheel Reversal Rate.
- SRR : Steering Wheel Reversal Rate. Expression anglaise pour indiquer une mesure de la fréquence des actions du conducteur sur le volant.
- TIV : Temps InterVéhiculaire. Indique l'intervalle de temps entre le passage de l'arrière du véhicule lièvre et le passage de l'avant du véhicule suiveur par rapport à un point fixe de l'environnement. Le TIV correspond à la distance intervéhiculaire divisée par la vitesse du véhicule suiveur.
- TLC : Time to Line Crossing. Expression anglaise pour indiquer le temps restant avant de franchir le bord de la voie de circulation si aucune action de correction n'est entreprise.
- TTC : Time To Collision. Expression anglaise pour indiquer le temps restant avant une collision si aucune action de correction n'est entreprise. Le TTC correspond à la distance intervéhiculaire divisée par la vitesse relative (ou vitesse différentielle).
- τ : Tau. Variable optique correspondant à l'inverse du taux d'expansion angulaire.

Glossaire

Conduite libre : Par opposition aux véhicules suiveurs, on considère qu'un véhicule est en situation de conduite libre lorsque sa vitesse n'est influencée par aucun véhicule se trouvant devant lui.

Distance de Visibilité Météorologique : Notée DVM, il s'agit d'une mesure de la densité du brouillard dont la valeur correspond à la distance à laquelle un grand objet horizontal noir présenté sur fond clair peut être vu.

Distance intervéhiculaire : Distance séparant deux véhicules qui se suivent, mesurée entre l'arrière du véhicule lièvre et l'avant du véhicule suiveur, également appelée Interdistance.

Intervalle : Mesure de l'écart entre deux véhicules qui se suivent, pouvant indifféremment correspondre à l'interdistance ou au Temps Intervéhiculaire.

Peloton : Il s'agit d'un ensemble d'au moins (généralement) deux véhicules roulant dans le même sens de circulation et dans la même voie, comportant un véhicule lièvre et un/des véhicule(s) suiveur(s), et où la vitesse adoptée par chaque véhicule suiveur est affectée par celle du véhicule qui se trouve devant lui. De façon plus opérationnelle, on considère qu'un peloton est un ensemble de véhicules qui se suivent avec des Temps Intervéhiculaires inférieurs à une valeur fixée.

Temps Intervéhiculaire : Mesure temporelle de l'écart entre deux véhicules qui se suivent. Le temps Intervéhiculaire, noté TIV, correspond à l'intervalle de temps qui sépare le passage de l'arrière du véhicule lièvre et le passage de l'avant du véhicule suiveur par rapport à un point fixe de l'environnement.

Véhicule lièvre : Lorsque plusieurs véhicules se suivent dans la même voie de circulation, le premier est appelé le véhicule lièvre.

Véhicule suiveur : Lorsque plusieurs véhicules se suivent dans la même voie de circulation, les véhicules autres que le véhicule lièvre sont les véhicules suiveurs.

Problématique générale

Les études accidentologiques montrent qu'en condition de brouillard, le risque d'accident est augmenté de 50% et que les accidents sont deux fois plus graves qu'en condition de visibilité normale. Ces accidents représentent ainsi plus de 2% des tués sur la route en France alors qu'on ne compte qu'une dizaine de jours de brouillard par an. L'amélioration de la sécurité routière par temps de brouillard constitue donc un enjeu non négligeable de santé publique.

Les études de trafic montrent par ailleurs que les conducteurs adoptent des comportements dangereux par temps de brouillard. Ces comportements à risque sont d'une part des vitesses excessives au regard des conditions de visibilité, et d'autre part des intervalles trop courts. Bulté (1985) montre par exemple que la proportion de conducteurs ayant des intervalles inférieurs à deux secondes (considérés comme dangereux) est deux fois plus importante par temps de brouillard qu'en condition de visibilité normale. Ces intervalles courts sont souvent considérés comme l'une des causes des collisions arrière.

Il existe principalement deux courants de recherche ayant tenté d'expliquer l'adoption d'intervalles courts par temps de brouillard. La première approche (Schönbach, 1996, 1997) vise à expliquer la réduction des intervalles à travers deux théories de la psychologie sociale : la réactance psychologique et la comparaison sociale. Selon l'auteur, les conducteurs cherchent d'une part à s'éloigner du véhicule qui les suit, car il est perçu comme une gêne et une restriction de leur liberté d'action (théorie de la réactance psychologique), et d'autre part à adopter le même comportement que le véhicule qui les précède, utilisé alors comme guide social (théorie de la comparaison sociale). Ce processus, où chaque conducteur s'éloigne du véhicule suiveur et se rapproche du véhicule suivi, conduit *in fine*, à l'adoption d'intervalles courts et à une augmentation de la vitesse du peloton.

La seconde approche s'intéresse aux difficultés perceptives causées par le brouillard. En limitant la visibilité du véhicule suivi et de l'environnement, le brouillard réduit la quantité d'informations visuelles disponibles. Le manque d'informations peut alors donner lieu à des distorsions perceptives, comme par exemple une surestimation de la distance et une sous-estimation de la vitesse (e.g. Brown, 1970 ; Ross, 1975). L'adoption d'intervalles courts en

condition de brouillard peut alors être la conséquence d'un rapprochement involontaire causé par ces distorsions perceptives, mais aussi être le résultat d'une adaptation des conducteurs face aux difficultés d'anticipation et de contrôle du véhicule causées par le brouillard. *C'est précisément à partir de cette approche des mécanismes perceptifs et perceptivo-moteurs que nous chercherons à expliquer la réduction des intervalles par temps de brouillard, dans le cadre de cette thèse.*

En ce qui concerne les processus perceptifs susceptibles d'être affectés lors de la conduite par temps de brouillard, l'hypothèse d'une sous-estimation de la vitesse propre (Reinhardt-Rutland, 1986) visant à expliquer la réduction des intervalles peut être remise en question. En effet, la sous-estimation de la vitesse propre observée par Snowden, Stimpson, et Ruddle (1998) avec une atténuation uniforme du contraste n'a pas été retrouvée lorsque le brouillard était simulé de façon plus réaliste (i.e. atténuation progressive du contraste avec la distance) (Cavallo & Pinto, 2001 ; Pretto, & Chatziastros, 2006 ; Pretto, Vidal, & Chatziastros, 2008).

En revanche, un phénomène de surestimation de la distance intervéhiculaire a été mis en évidence par des expérimentations en salle de brouillard (Cavallo, Colomb, & Doré, 2000, 2001). Cette surestimation a été observée dans des conditions de brouillard très dense, où la silhouette des véhicules n'était pas visible et que ceux-ci n'étaient perçus que par leurs feux. Des résultats similaires ont été obtenus à partir d'images générées informatiquement (Buchner, Brandt, Bell, & Weise, 2006). Si l'on peut supposer que cette distorsion perceptuelle contribue à la diminution des interdistances par temps de brouillard, la validité écologique de ces résultats reste toutefois à établir. Il nous a ainsi paru nécessaire de mener de nouvelles recherches afin de clarifier le rôle d'une surestimation des interdistances en ce qui concerne la réduction des intervalles par temps de brouillard.

D'autres facteurs peuvent également être invoqués pour expliquer la diminution des intervalles par temps de brouillard. La littérature suggère fréquemment que les conducteurs ont tendance à vouloir maintenir le contact visuel avec le véhicule roulant devant. Mais certains travaux montrent que la distance de suivi est considérablement plus courte que la distance de visibilité des feux arrière du véhicule précédent (Cavallo & Beaudoin, 2003 ; White & Jeffery, 1980). L'adoption d'interdistances courtes ne peut donc pas s'expliquer seulement par le maintien du contact visuel. White & Jeffery (1980) font l'hypothèse que les conducteurs adoptent des interdistances courtes parce qu'elles diminuent les seuils de détection du rapprochement et permettent ainsi une meilleure régulation des intervalles entre

Problématique générale

les véhicules. Ces considérations nous ont amené à étudier l'effet du brouillard sur la sensibilité au mouvement relatif (i.e. l'éloignement ou le rapprochement du véhicule suivi) ainsi que ses conséquences sur le contrôle de l'intervalle.

Finalement, Malaterre, Hary, et Quéré (1991) ont montré que le brouillard affecte le contrôle directionnel, en faisant disparaître la composante anticipatoire et en limitant le contrôle de la trajectoire à un mode rétroactif. L'inconvénient de ce mode de contrôle est qu'il s'effectue en continue, impliquant ainsi une plus grande charge attentionnelle. Ceci pourrait être une des raisons pour lesquelles les conducteurs, par temps de brouillard, préfèrent suivre un véhicule. Malaterre et al. (1991) supposent que cette stratégie, susceptible de faciliter la tâche de conduite, nécessite un suivi de près pour éviter des erreurs de placement, ce qui expliquerait les interdistances courtes.

En résumé, cette thèse a pour objectif de préciser les conditions d'apparition du phénomène de surestimation des interdistances et à mesurer son ampleur dans des conditions proches de la conduite réelle. Elle cherche par ailleurs à déterminer si la sensibilité au mouvement relatif est affectée par le brouillard. La thèse vise enfin à étudier les processus de contrôle de l'intervalle et de la trajectoire susceptibles d'être impliqués dans l'adoption d'intervalles courts par temps de brouillard.

Les expérimentations réalisées ont bénéficié du simulateur de conduite de l'INRETS et de la validation du brouillard simulé en condition diurne (Cavallo, Dumont & Gallée, 2002). Contrairement aux études en salle de brouillard, ces outils nous ont permis d'étudier une large gamme d'interdistances dans des situations dynamiques (i.e. véhicule en mouvement) et dans des conditions de brouillard de différentes densités.

Chapitre 1 : Introduction

1 Accidentologie et brouillard

Le brouillard fait partie des conditions météorologiques dégradées qui apparaissent peu souvent puisqu'on comptabilise seulement une dizaine de jours de brouillard par an dans le nord de la France (Malaterre, Hary, & Quéré, 1991). La sécurité routière par temps de brouillard constitue pourtant un enjeu non négligeable puisque le risque d'accident est augmenté de 50% et que c'est justement dans ces conditions que les accidents sont les plus graves. Avec 14.6 tués pour 100 accidents, les accidents survenus par temps de brouillard sont en effet deux fois plus graves que l'ensemble des accidents corporels en France (Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière, 2008). La gravité des accidents survenus par temps de brouillard apparaît également à travers les proportions d'accidents au regard de l'ensemble des accidents enregistrés. Ainsi, les 0.85% d'accidents corporels ayant eu lieu par temps de brouillard en France en 2006 ont tout de même représenté 2.2% des tués (Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière, 2007). Finalement, la proportion de décès par accident en condition de brouillard est plus élevée en France comparé à la moyenne de 18 membres de l'Union Européenne qui n'est que de 1.4% (European Road Safety Observatory, 2007). Au-delà de cette gravité, le brouillard génère également des accidents spectaculaires sur les autoroutes, impliquant de nombreux véhicules et paralysant la circulation.

Les études statistiques permettent de savoir plus précisément dans quelles conditions ont lieu les accidents par temps de brouillard (Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière, 2008). On constate ainsi qu'ils sont concentrés entre les mois d'octobre et de février (80%), et qu'ils ont lieu majoritairement la nuit (65%). C'est effectivement à ces périodes qu'il y a le plus de brouillard. Mentionnons tout de même qu'une part importante des accidents par temps de brouillard (30%) se produisent entre 7h et 9h du matin. Cette proportion élevée s'explique par la présence fréquente de brouillard dans ce créneau horaire corrélée avec la densité élevée du trafic. Par ailleurs, Malaterre (1991) a étudié les procès verbaux d'accidents autoroutiers. Parmi les accidents recensés en temps de brouillard, près de deux-tiers des véhicules impliqués l'étaient dans des collisions arrière. Ces travaux pointent donc le risque de

collision arrière par temps de brouillard, et nous ont conduit à nous intéresser à la situation de suivi de véhicule.

2 Comportement observé par temps de brouillard

Plusieurs études de trafic ont été menées sur autoroute afin d'étudier la circulation des véhicules dans différentes conditions de visibilité (Bulté, 1985 ; Hawkins, 1988 ; Hogema & van der Horst, 1994a ; White & Jeffery, 1980). Ces études ont permis de mesurer la vitesse des véhicules ainsi que leurs intervalles. Les données obtenues ont ensuite été mises en relation avec la densité du brouillard.

2.1 Vitesses

L'influence du brouillard sur les vitesses adoptées par les conducteurs apparaît de façon similaire pour les quatre études de trafic mentionnées ci-dessus. Ces études permettent de distinguer deux gammes de densité de brouillard donnant lieu à des comportements différents. Ainsi, les brouillards légers et de moyenne densité ont peu d'influence sur les vitesses pratiquées. Bulté (1985) et Hogema et van der Horst (1994a) constatent par exemple que la vitesse diminue légèrement avec l'augmentation de la densité du brouillard, jusqu'à ce que la Distance de Visibilité Météorologique¹ (DVM) soit de l'ordre de 100 à 200 m. Lorsque le brouillard devient dense ($DVM < 100$ m), voire très dense ($DVM < 50$ m), la vitesse diminue de façon nettement plus marquée. Ainsi, les vitesses enregistrées par ces quatre études sont de l'ordre de 100 km/h pour les brouillards légers (i.e. $DVM > 100$ m), et chutent aux environs de 50 km/h pour les brouillards les plus denses (i.e. $DVM = 30$ à 40 m). Seul Bulté (1985) constate des vitesses très élevées (70 à 80 km/h) pour les brouillards très denses. La Figure 4 présente une vue schématique des vitesses enregistrées en fonction de la densité du brouillard.

¹ La Distance de Visibilité Météorologique, notée DVM, est une mesure de la densité du brouillard. Elle correspond à la distance à laquelle un grand objet noir présenté sur fond clair peut être vu. La Distance de Visibilité Météorologique est présentée de façon plus détaillée en page 23.

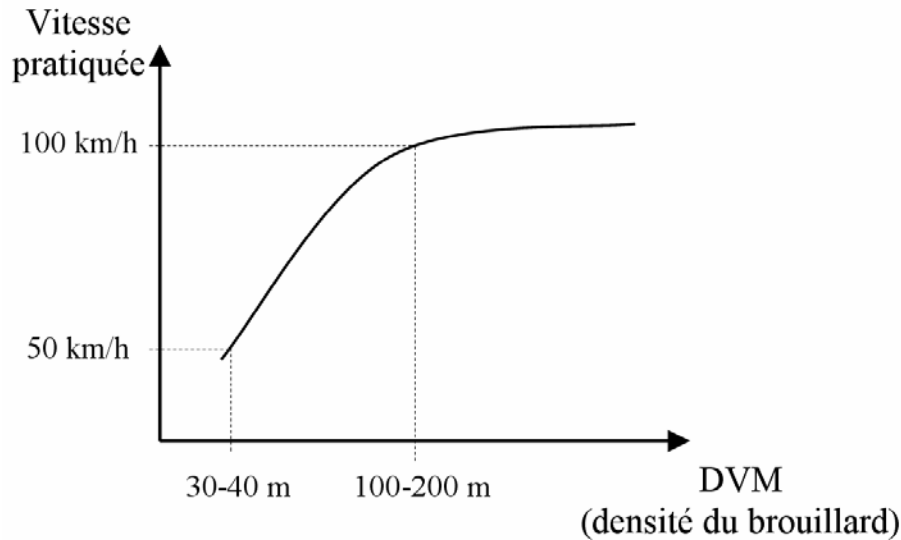


Figure 1 : Vue schématique des vitesses enregistrées par les études de trafic en temps de brouillard : Vitesse pratiquée en fonction de la Distance de Visibilité Météorologique (DVM), représentant la densité du brouillard.

En plus d'avoir mesuré les vitesses pratiquées, plusieurs auteurs ont cherché à savoir pour quelles densités de brouillard les conducteurs ne seraient pas en mesure de s'arrêter s'il y avait un obstacle immobile sur la route. Bulté (1985) et Hogema et van der Horst (1994a) montrent que les conducteurs ne pourraient généralement pas s'arrêter avant l'obstacle lorsque le brouillard est très dense (DVM entre 40 et 100 m d'après Hogema et van der Horst). De plus, Bulté (1985) montre que la proportion de conducteurs dans l'impossibilité de s'arrêter avant l'obstacle est d'autant plus élevée que le brouillard est dense, avec une proportion de 96% pour les brouillards très denses (DVM=50 m). Les données présentées par Bulté (1985) et Hogema et van der Horst (1994a) montrent que malgré la réduction très marquée de la vitesse dans les brouillards denses, elle reste trop élevée pour permettre l'évitement, par freinage, d'un obstacle immobile. D'une façon générale, les études de trafic mentionnées ci-dessus s'accordent pour constater que les vitesses pratiquées par temps de brouillard sont excessives par rapport à la distance de visibilité.

2.2 Intervalles

Parmi les quatre études de trafic citées ci-dessus, trois mettent en évidence une réduction dangereuse du Temps Intervéhiculaire² (TIV) en condition de brouillard diurne et nocturne (Bulté, 1985 ; Hawkins, 1988 ; White & Jeffery, 1980). Ces trois études montrent qu'il y a en

² Voir glossaire pour définition.

condition de brouillard, une augmentation de la proportion de véhicules ayant des intervalles dangereux inférieurs à deux secondes. Le résultat le plus marquant est celui de Bulté (1985) qui montre que cette proportion d'intervalles dangereux est deux fois plus importante par temps de brouillard dense (DVM comprise entre 25 et 50 m) qu'en condition de visibilité normale : elle passe de 12% à 28%. De plus, Bulté (1985) et Hawkins (1988) constatent également une augmentation avec le brouillard de la proportion d'intervalles très courts, inférieurs à une seconde. Hawkins (1988) n'observe toutefois cette augmentation de la proportion d'intervalles très courts que sur la voie rapide.

Ces résultats peuvent laisser penser que la réduction des intervalles est nécessaire pour garder le contact visuel avec le véhicule lièvre. Certains travaux réalisés sur simulateur de conduite ont justement montré qu'une partie des participants cherchent à garder en vue le véhicule lièvre, quitte à réduire leur intervalle (Broughton, Switzer, & Scott, 2007) ou à augmenter leur vitesse (Debus et al., 2005). Pourtant, les travaux de White et Jeffery (1980) ne confirment pas cette interprétation basée sur la nécessité de garder le contact visuel. En effet, White et Jeffery ont observé des intervalles très courts (valeur modale de 0.75 s) pour des brouillards de densité moyenne où les feux arrière du véhicule lièvre pouvaient être vus avec un intervalle de 9 s. Cette observation faite en brouillard nocturne, montre clairement que la réduction des intervalles ne vise pas à garder le contact visuel avec le véhicule lièvre. Corollairement à la réduction des intervalles par temps de brouillard, White et Jeffery (1980) observent la tendance plus marquée des conducteurs à former des pelotons en condition de brouillard. De même, Hawkins (1988) constate une augmentation de la taille des pelotons et une diminution de leur nombre par temps de brouillard.

Les études de Bulté (1985), de Hawkins (1988) et de White et Jeffery (1980) suggèrent que les conducteurs réduisent dangereusement leur TIV en condition de brouillard, alors qu'il leur serait possible de garder le contact visuel avec le véhicule lièvre tout en gardant une marge de sécurité raisonnable. Néanmoins, Hogema et van der Horst (1994a) ne partagent pas ce point de vue. Ils montrent effectivement que les interdistances sont d'autant plus courtes que le brouillard est dense, mais que cette réduction coïncide avec la réduction de la vitesse. Cette correspondance entre les interdistances et la vitesse, conduit à ce que les TIV pratiqués restent inchangés par temps de brouillard. Les TIV mesurés par Hogema et van der Horst (1994a) restent ainsi compris entre 2 et 3 s, indépendamment de la densité du brouillard. Selon ces auteurs, cette différence peut s'expliquer par rapport au débit (mesuré en véhicules

par heure) plus faible dans leur étude que dans celle de White et Jeffery (1980). La proportion d'intervalles courts augmente effectivement de façon linéaire avec le débit (Aron, Biecheler, & Peytavin, 1999). Néanmoins, il n'y a aucune certitude que cette relation soit plus prononcée par temps de brouillard qu'en condition de visibilité normale.

3 Lien entre intervalles courts et collisions arrière ?

Nous venons de faire le constat d'un comportement inadapté des conducteurs par temps de brouillard, qui se manifeste notamment par des intervalles plus courts qu'en condition de visibilité normale. Il se pose néanmoins la question de savoir dans quelle mesure ces intervalles courts sont la cause, ou l'une des causes, des accidents par temps de brouillard. On considère généralement qu'une situation de suivi de véhicule est d'autant plus risquée que l'intervalle entre les véhicules est court. Ainsi, van der Hulst, Rothengatter, et Meijman (1998) considèrent que l'intervalle de suivi correspond à une marge de sécurité. De même, Vogel (2003) considère le TIV comme un indicateur de sécurité. Selon cet auteur, les TIV courts génèrent des situations potentiellement dangereuses. Par exemple, si deux véhicules se suivent à la même vitesse et que le véhicule lièvre effectue un freinage d'urgence jusqu'à l'arrêt complet, alors en freinant aussi fort, le conducteur du véhicule suiveur ne pourra éviter la collision que si le TIV est plus long que son temps de réaction. Bien sûr, cet exemple ne rend pas compte de la diversité des scénarii rencontrés en situation réelle. Il ne rend notamment pas compte des variations de la capacité de freinage d'un véhicule à l'autre, qui impose de garder des TIV plus longs (Harris, 1964).

Malaterre (1991) suggère que 8 à 20% des accidents pourraient théoriquement être évités (toutes conditions météorologiques confondues) si tous les conducteurs maintenaient une interdistance suffisante par rapport au véhicule qui les précède. Selon cet auteur, une interdistance suffisante correspond à la distance nécessaire pour s'arrêter sans changer de file quel que soit le freinage du véhicule précédent, mais pas au point de faire face à un obstacle immobile.

Malgré ces arguments forts qui montrent l'importance de garder des marges de sécurité suffisantes, Aron, Biecheler, et Peytavin (1996) soulignent que le lien entre TIV courts et collisions arrière n'a jusqu'alors pas été prouvé. Afin de savoir s'il existe un tel lien, Aron, Biecheler, et Peytavin (1996, 1999) ont mené une étude accidentologique. Cette étude se base

d'une part sur le recensement des accidents corporels et d'autre part sur les enregistrements du débit horaire, qui est représentatif de la proportion d'intervalles courts. L'étude de Aron et al. (1996, 1999) ne met pas en évidence de relation claire entre le nombre de collisions arrière et la proportion d'intervalles courts. Cette absence de relation peut avoir plusieurs raisons. D'une part, les auteurs constatent une forte proportion de collisions arrière en condition nocturne alors que le débit γ est très faible. Ces collisions semblent être liées à des différentiels de vitesse importants entre les véhicules et non à des intervalles courts. D'autre part, nous supposons que différents mécanismes permettent de compenser l'augmentation du risque liée aux TIV courts : (i) une attention plus soutenue permet de réagir rapidement aux décélérations du véhicule lièvre et ainsi de réduire le risque, (ii) par temps clair, les décélérations du véhicule lièvre peuvent souvent être anticipées, ce qui permet de réagir plus tôt (van der Hulst, 1999), et (iii) le temps nécessaire à la perception de la décélération du véhicule lièvre est d'autant plus court que l'intervalle est réduit (e.g. Duckstein, Unwin, & Boyd, 1970).

Malgré les résultats contraires obtenus par Aron et al. (1999), nous pouvons considérer, comme la grande majorité des auteurs, qu'une situation de suivi de véhicule est d'autant plus sûre que l'intervalle est long. En effet, bien que l'augmentation du risque liée à une réduction de l'intervalle puisse être compensée par différents mécanismes, un intervalle long permet de faire face à des périodes d'inattention ou à une capacité de freinage insuffisante du véhicule.

4 Le suivi de véhicule

Pour mieux comprendre les mécanismes par lesquels le brouillard peut amener les conducteurs à adopter des intervalles courts, nous allons présenter brièvement la tâche de suivi de véhicule, par rapport à l'activité de conduite en général.

Tout d'abord, la conduite est une activité complexe qui comprend plusieurs registres de régulation. Dans son modèle, Michon (1985) distingue trois niveaux correspondant à trois échelles de temps : le niveau opérationnel où l'échelle de temps est de l'ordre de la seconde, le niveau tactique avec une échelle de temps de l'ordre de plusieurs secondes, et le niveau stratégique où l'échelle de temps peut être de plusieurs heures. La conduite se compose ainsi de tâches très diverses telles que le contrôle de l'intervalle et le contrôle de la trajectoire que nous étudierons, ou encore le contrôle de la vitesse, le dépassement, le choix de l'itinéraire,

etc. Les informations utilisées pour réaliser ces tâches sont principalement visuelles (Hills, 1980 ; Sivak, 1996).

En situation de suivi de véhicule, la principale tâche consiste à contrôler l'intervalle par rapport au véhicule lièvre. La littérature suggère que les conducteurs régulent leur intervalle en cherchant à rester proche de leur TIV préférentiel (Colbourn, Brown, & Copeman, 1978 ; Malaterre, 1995 ; Taieb-Maimon & Shinar, 2001 ; van Winsum & Heino, 1996). Par conséquent, l'interdistance augmente avec la vitesse tandis que le TIV reste relativement constant. Néanmoins, le TIV adopté par les conducteurs varie en fonction d'autres facteurs. D'une façon générale, Boer (1999a) considère que le TIV adopté correspond à un équilibre entre des facteurs motivationnels, perceptifs et de contrôlabilité³. De plus, les prévisions des conducteurs sur la circulation plus lointaine ou leurs attentes en général, semblent également influencer le TIV qu'ils adoptent (Colbourn et al., 1978 ; Carré, Lassarre, & Liger 1985). Les conducteurs peuvent également accepter temporairement des intervalles plus courts, par exemple lorsqu'ils préparent un dépassement (Saad, 1996b).

D'autre part, il ne suffit pas d'adopter un intervalle préférentiel pour suivre un véhicule, il faut également le contrôler. Selon Saad (1996a, 1996b), la tâche de suivi de véhicule consiste à s'adapter aux contraintes et aux variations du trafic, et à détecter les variations critiques, i.e. celles nécessitant une action pour éviter la collision. De façon similaire, Boer (1999a) considère que les conducteurs ne cherchent pas à atteindre des performances optimales, mais plutôt à les maintenir dans une fourchette d'acceptabilité. Les conducteurs tendraient ainsi à limiter les actions de correction (i.e. les mouvements des pédales d'accélérateur et de frein), ce qui en conséquence limiterait la charge mentale impliquée dans le contrôle de l'intervalle. Ce dernier point va dans le sens du principe selon lequel les conducteurs chercheraient à minimiser l'effort impliqué dans le contrôle du trafic et la réalisation des ajustements (Carré, Lassarre, Liger, 1985 ; Saad, 1996b).

Le TIV adopté et sa régulation dépendent donc de nombreux facteurs perceptifs et attentionnels. En réduisant la quantité d'informations disponibles, en modifiant l'apparence

³ L'auteur entend par contrôlabilité, la capacité des conducteurs à contrôler leur véhicule, ce qui inclut les facteurs perceptivo-moteurs, mais également la dynamique du véhicule et les conditions environnementales (e.g. adhérence).

des objets, et en diminuant leur distance de visibilité, le brouillard va produire des effets visuels susceptibles de perturber le contrôle de l'intervalle.

5 Les effets visuels du brouillard

5.1 Les causes du brouillard et ses effets visuels

L'apparition du brouillard est généralement due à une baisse de la température au sol qui se propage aux couches de l'atmosphère (brouillard de rayonnement) ou à l'arrivée d'une masse d'air plus humide (brouillard d'advection) (Bergot, Noilhan, & Bougeault, 2002). Lorsque l'humidité atmosphérique dépasse le seuil de saturation, la vapeur d'eau se condense autour de noyaux. Ces noyaux peuvent être constitués de particules de poussière, de fumée, de pollution automobile et industrielle, ou encore de sel marin (Hautière, 2005). La conséquence de cette condensation est la formation de gouttelettes d'eau, d'un diamètre allant de quelques dixièmes à quelques dizaines de microns (Dumont, Paulmier, Carta, Rozé, & Girasole, 2002). En conséquence, une partie de la lumière est absorbée tandis qu'une autre partie est diffusée par ces gouttelettes. Le phénomène d'absorption étant négligeable, les effets visuels du brouillard sont principalement ceux de la diffusion de la lumière dans différentes directions, i.e. les rayons lumineux sont déviés de leur direction initiale (Hautière, 2005).

Du fait de la diffusion de la lumière, le brouillard donne lieu à différents effets visuels. Le principal effet est une atténuation exponentielle du contraste avec la distance (Paulmier, 2004). L'une des conséquences de l'atténuation du contraste est un délavement des couleurs. Ainsi, tous les objets éloignés apparaissent gris (White & Jeffery, 1980). Par ailleurs, le brouillard crée un voile lumineux qui contribue à masquer les objets (cf. section 5.2.2). En condition nocturne, ce voile est causé par la diffusion vers l'arrière du flux lumineux issu de l'éclairage du véhicule (Dumont & Cavallo, 2004). En condition diurne, le voile lumineux est causé par la lumière du soleil. Sa luminance dépend alors principalement de la position du soleil et de la taille des gouttelettes d'eau qui composent le brouillard (Paulmier, 2004). Le brouillard crée également des halos autour des sources lumineuses (e.g. les feux de véhicules), dont la visibilité augmente avec le diamètre des gouttelettes d'eau (Dumont & Cavallo, 2004). Enfin, le brouillard facilite légèrement le transfert des basses fréquences spatiales (<10 cycles

par degrés) comparativement aux autres fréquences (Fournela, 2002). Mais contrairement aux idées reçues, il ne rend pas flou le bord des objets (Dumont, 2002).

5.2 Contraste et distance de visibilité des objets

Pour calculer le contraste de luminance d'un objet par rapport au fond, nous utilisons la formule suivante :

$$C = \frac{L_o - L_f}{L_f}$$

où C est le contraste entre un objet de luminance L_o (cd/m^2) et le fond de luminance L_f (cd/m^2). Ainsi, en prenant l'exemple d'un objet de couleur noire ($L_o=0$), la valeur absolue du contraste est de 1 (i.e. 100%).

5.2.1 *Loi de Koschmieder*

Nous avons vu précédemment qu'en condition de brouillard, le contraste des objets est atténué de façon exponentielle avec la distance. En réalité, cette atténuation existe également en condition de visibilité normale, mais elle est souvent négligée car elle y est beaucoup moins marquée. L'atténuation du contraste avec la distance est modélisée par la loi de Koschmieder (e.g. Paulmier, 2004) :

$$C = C_0 \cdot e^{-k \cdot d}$$

où C_0 est le contraste intrinsèque de l'objet observé (i.e. le contraste en l'absence de brouillard) et C est le contraste observé à une distance d (m) lorsque le coefficient d'extinction du brouillard est k (m^{-1}). Le coefficient d'extinction k est une mesure de la densité du brouillard. Une autre mesure de la densité de brouillard que nous avons déjà évoquée est la Distance de Visibilité Météorologique, notée DVM (m). Cette dernière est plus facile à appréhender car elle est définie empiriquement comme étant la distance à laquelle un grand objet noir présenté sur fond clair peut être vu. On considère arbitrairement qu'un objet est visible lorsque son contraste de luminance par rapport au fond est d'au moins 5% (Paulmier, 2004). En utilisant ce seuil et en considérant qu'un objet noir sur fond clair a un contraste de 100%, il est possible de définir numériquement la Distance de Visibilité Météorologique DVM en fonction du coefficient d'extinction k :

$$DVM = \frac{-\ln(0.05)}{k} \approx \frac{3}{k}$$

A partir de cette relation, nous pouvons reformuler la loi de Koschmieder en fonction de la Distance de Visibilité Météorologique DVM :

$$C \approx C_0 \cdot e^{\frac{-3 \cdot d}{DVM}}$$

Ainsi, lorsque l'objet cible est observé de très près, son contraste par rapport au fond est C_0 . Le contraste diminue lorsque l'observateur s'éloigne de l'objet, jusqu'à ce que ce dernier ne soit plus visible.

5.2.2 Loi d'Allard

La loi de Koschmieder, décrite ci-dessus, peut être utilisée pour calculer le contraste des sources secondaires, i.e. des objets non lumineux. En revanche, dans le cas des sources primaires, i.e. des objets lumineux tels que les feux de véhicules, c'est la loi d'Allard qui doit être utilisée (e.g. Dumont, 2002) :

$$Et = \frac{I}{V^2} \cdot e^{-V \cdot k}$$

où k est le coefficient d'extinction (m^{-1}), V est la distance jusqu'à laquelle la source lumineuse peut être vue (m), I est l'intensité lumineuse de la source (cd), et Et est le seuil d'éclairement (lux), i.e. l'éclairement minimum qui peut être perçu dans la luminosité ambiante. Pour calculer la distance jusqu'à laquelle un objet lumineux peut être vu, cette dernière équation peut être reformulée de la façon suivante :

$$V = \frac{2}{k} \cdot W \left(\frac{k}{2} \cdot \left(\frac{I}{Et} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

où W représente la fonction W de Lambert (cf. Corless, Gonnet, Hare, Jeffrey, & Knuth, 1996).

Enfin, selon White et Jeffery (1980), le seuil d'éclairement Et est fortement dépendant de la luminance du fond (donc de la luminosité ambiante), et se calcule de la façon suivante :

$$\log_{10}(Et) = 0.675 \cdot \log_{10}(B) - 5.7$$

où B (cd/m^2) représente la luminance du fond et varie dans des proportions importantes. En effet, la luminance du fond est de l'ordre de $10\,000 \text{ cd/m}^2$ par un jour lumineux, de 100 cd/m^2 par un jour très sombre, et de 0.1 cd/m^2 par une nuit de pleine lune (White & Jeffery, 1980).

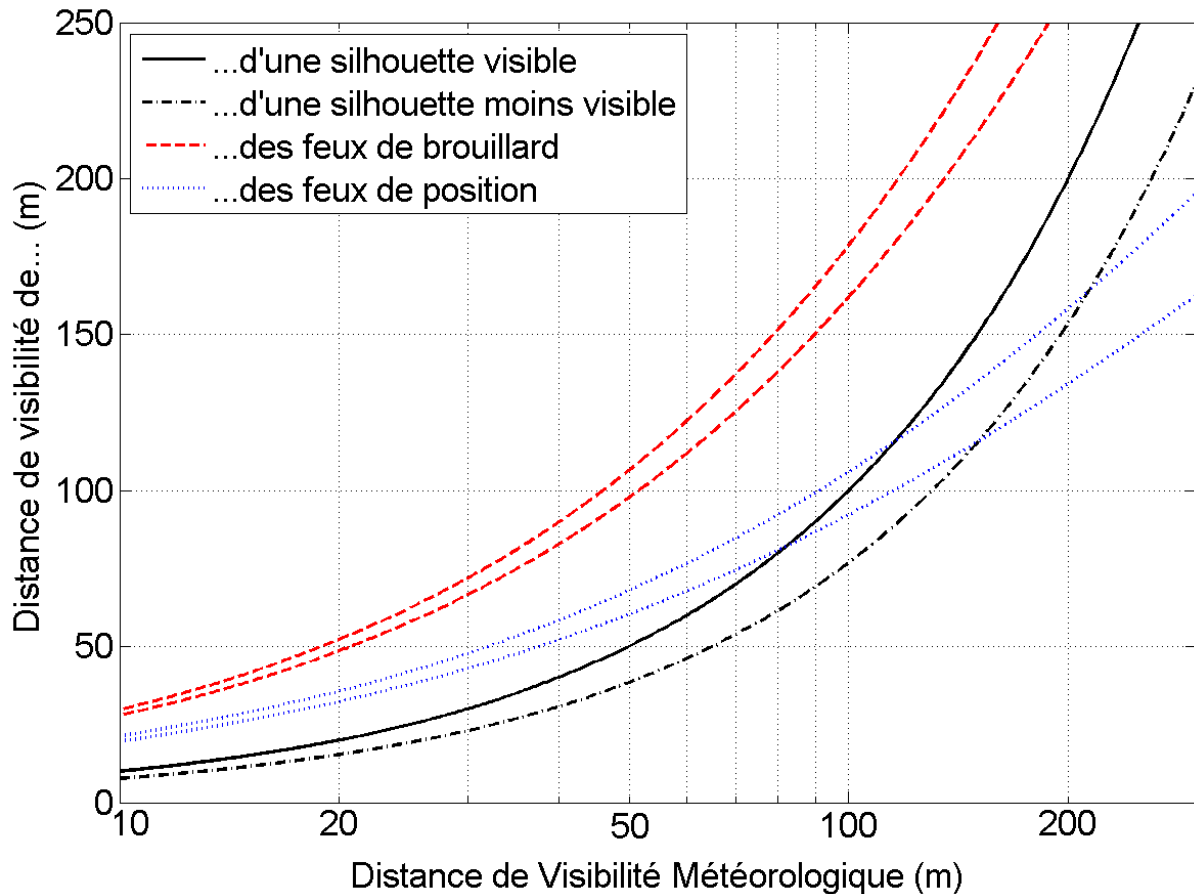


Figure 2 : Distance de visibilité de la silhouette et des feux arrière d'un véhicule dans le brouillard en fonction de la Distance de Visibilité Météorologique (DVM). La silhouette visible a un contraste intrinsèque de 100% (véhicule noir) alors que la silhouette moins visible a un contraste intrinsèque de 50%. Les courbes rouges correspondent à la visibilité de feux de brouillard de 150 et 300 cd. Les courbes bleues correspondent à la visibilité des feux de position de 6 et 12 candelas. Il s'agit dans les deux cas de l'intensité lumineuse minimale et maximale autorisé par la réglementation. La luminance de fond correspond à celle d'un jour très sombre (100 cd/m^2), utilisée sur le simulateur de conduite de l'INRETS.

Par conséquent, la loi de Koschmieder indique que la distance maximale de visibilité des objets non lumineux, tels que la silhouette des véhicules, dépend de leur contraste intrinsèque et de la densité du brouillard. Bien sûr, ces objets non lumineux ne sont vus qu'en condition diurne, mais leur distance de visibilité n'est pas liée à la luminance de fond. En revanche, pour

les feux des véhicules, la loi d'Allard indique que leur distance de visibilité maximale dépend de leur intensité lumineuse, de la densité du brouillard, et de la luminance de fond. En effet, plus la luminance de fond est élevée et plus la visibilité des feux est limitée. Il arrive même, lorsque le brouillard est léger et lumineux, que la silhouette du véhicule soit visible à une plus grande distance que ses feux de brouillard. La Figure 2 rend compte de l'influence des propriétés intrinsèques des objets observés (contraste et intensité lumineuse) sur leur distance de visibilité, et la Figure 3 rend compte de l'influence de la luminosité de fond.

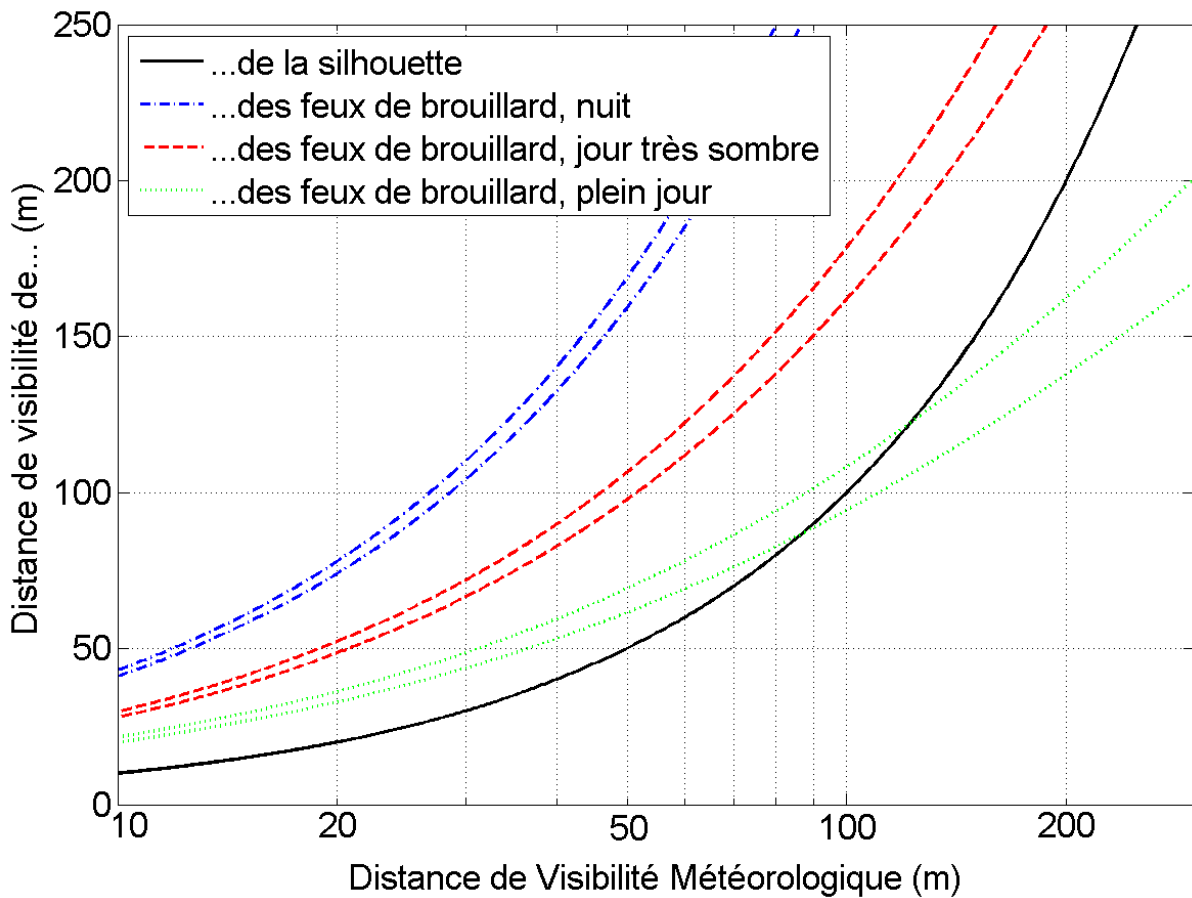


Figure 3 : Distance de visibilité de la silhouette et des feux de brouillard arrière d'un véhicule en fonction de la Distance de Visibilité Météorologique (DVM). La silhouette a un contraste intrinsèque de 100% (véhicule noir). La distance de visibilité de feux arrière de brouillard de respectivement 150 et 300 cd (i.e. intensité lumineuse minimale et maximale autorisé par la réglementation) est indiquée pour des luminances de fond correspondant respectivement à une nuit de pleine lune (0.1 cd/m^2), à un jour très sombre (100 cd/m^2) (valeur utilisée sur le simulateur de conduite de l'INRETS), et à un jour lumineux ($10\,000 \text{ cd/m}^2$).

6 Plan de lecture

Nous présentons dans les chapitres suivants les quatre expérimentations que nous avons réalisées afin de mieux comprendre les processus perceptifs et perceptivo-moteurs lors du suivi d'un véhicule en condition de brouillard. Trois hypothèses ont été étudiées :

Selon Brown (1970), Cavallo, Colomb, et Doré (2000, 2001), Malaterre et al. (1991) et Reinhardt-Rutland (1992), les conducteurs seraient amenés à suivre le véhicule lièvre de plus près en condition de brouillard à cause d'une surestimation des interdistances. Les auteurs supposent qu'une distorsion de l'interdistance perçue se répercute sur l'interdistance adoptée. Les travaux relatifs à cette hypothèse sont présentés dans le chapitre 2. Bien que la perception de l'interdistance en condition de brouillard ait déjà fait l'objet de plusieurs travaux, l'ensemble des résultats disponibles, présenté au point 1.3 du chapitre 2, ne semble pas entièrement cohérent et ne permet pas de savoir dans quelles conditions les interdistances sont surestimées. Pour lever ces incohérences et déterminer la validité de cette hypothèse, nous avons réalisé deux expérimentations où les participants devaient effectuer des jugements perceptifs (Chap. 2-2 et Chap. 2-3). L'interdistance, la densité du brouillard, et la visibilité du véhicule cible ont été variées, ainsi que plusieurs autres facteurs susceptibles d'affecter ces jugements. Les résultats sont interprétés en termes de disponibilité d'informations de distance et en référence à des modèles de fusion d'informations (Chap. 2-2.3 et Chap. 2-3.3). Nous discutons pour finir, des conséquences en termes de sécurité routière (Chap. 2-4.4).

La seconde hypothèse à laquelle nous nous sommes intéressé porte sur la sensibilité au mouvement relatif. White et Jeffery (1980) supposaient que les conducteurs ayant une mauvaise vue seraient amenés à suivre de plus près par temps de brouillard pour obtenir des indices visuels sur la décélération du véhicule lièvre. D'une façon plus générale, nous faisons l'hypothèse que le brouillard réduit la sensibilité au mouvement relatif pour l'ensemble des conducteurs, et que cette diminution de la sensibilité se répercute sur la situation de suivi de véhicule sous forme d'une réduction de l'intervalle. Dans le chapitre 3, nous présentons d'abord une revue de la littérature sur les mécanismes de perception du mouvement dans le plan sagittal ainsi que, plus spécifiquement, sur la perception du mouvement relatif en situation de suivi de véhicule (Chap. 3-1). Aucun de ces travaux n'a porté sur les effets du brouillard. Nous avons donc réalisé deux expérimentations visant à étudier les effets du brouillard sur la sensibilité au mouvement relatif dans le plan sagittal (Chap. 3-2 et Chap. 3-

3). Ces expériences utilisant des tâches de jugement perceptif, nous ont permis de préciser les conditions dans lesquelles le brouillard affecte la discrimination du mouvement relatif. Les résultats sont interprétés en termes d'information d'expansion/contraction du véhicule et de leur interaction avec le flux optique environnemental (Chap. 3-2.3 et Chap. 3-3.3). Les possibles conséquences pour le contrôle de la distance intervéhiculaire sont discutées (Chap. 3-4).

Dans une troisième expérience, nous avons étudié les conséquences d'une diminution de la sensibilité au mouvement relatif sur le contrôle de l'intervalle (Chap. 4). Afin de mieux appréhender les mécanismes du contrôle de l'intervalle, nous présentons une synthèse des modèles de suivi de véhicule (Chap. 4-1). Nous présentons ensuite l'expérimentation réalisée sur simulateur de conduite, au cours de laquelle les participants devaient suivre un véhicule lièvre dans différentes conditions de visibilité et de vitesse (Chap. 4-2). Nous avons étudié les intervalles adoptés par les participants, la précision du contrôle de l'intervalle, ainsi que la charge mentale (Chap. 4-3). Nous discutons ensuite des intervalles adoptés par les participants en distinguant quatre stratégies (Chap. 4-4).

Enfin, nous nous sommes intéressé à une troisième hypothèse portant sur l'influence des exigences de contrôle de la trajectoire sur la régulation de la distance intervéhiculaire (Chap. 5). Les travaux de Malaterre et al. (1991) ont montré que le masquage des repères lointains par le brouillard affecte les mécanismes du contrôle de trajectoire dans le sens d'une suppression de la composante anticipatoire de ce contrôle. Les auteurs font l'hypothèse qu'en fournissant les informations manquantes sur la trajectoire future, le suivi d'un véhicule permet de rétablir un contrôle anticipatoire. Les travaux de Mars (2006, 2007) indiquent également un bénéfice à suivre un véhicule. Il serait cependant nécessaire de le suivre de près pour éviter les erreurs de placement sur la chaussée (Malaterre et al., 1991). Nous présentons les modèles et les travaux sur lesquels reposent cette hypothèse (Chap. 5-1). Nous présentons ensuite les résultats de notre étude qui porte sur une situation de suivi de véhicule où les exigences liées à la tâche de contrôle de la trajectoire étaient importantes (Chap. 5-2 et Chap. 5-3). Nous nous sommes intéressé aux intervalles adoptés par les participants, à la précision du contrôle de trajectoire, et à la charge mentale. Nous discutons pour finir des contraintes liées à l'utilisation du véhicule lièvre comme guide (Chap. 5-4).

Chapitre 1 : Introduction

Dans le dernier chapitre (Chap. 6), nous présentons une synthèse des travaux effectués et des résultats obtenus. Nous discutons les limites de nos travaux et proposons des perspectives pour de futures recherches.

Chapitre 2 : Estimation de la distance intervéhiculaire

Comme nous l'avons évoqué dans le premier chapitre, l'adoption d'intervalles plus courts par temps de brouillard que par temps clair pourrait être due à une surestimation⁴ de la distance intervéhiculaire causée par le brouillard (Brown, 1970 ; Malaterre, Harry, & Quéré, 1991 ; Reinhardt-Rutland, 1992). En effet, si la distance intervéhiculaire perçue est plus grande par temps de brouillard que par temps clair, alors les conducteurs pourraient réduire l'intervalle par temps de brouillard afin de retrouver l'intervalle préférentiel perçu habituellement. Nous avons donc cherché à savoir dans quelles conditions le brouillard conduit à une surestimation des interdistances.

7 Introduction

7.1 Rôle de l'interdistance perçue en situation de suivi de véhicule

On peut supposer que si l'interdistance perçue est plus grande pour certaines conditions qu'elle ne l'est habituellement, alors les conducteurs pourraient dans ces mêmes conditions, réduire l'intervalle afin de retrouver l'intervalle préférentiel perçu habituellement. Nous n'avons cependant pas connaissance de travaux ayant cherché à mettre en relation l'interdistance perçue et l'intervalle adopté en situation de suivi de véhicule. La question de l'existence d'une relation entre l'interdistance perçue et l'intervalle adopté soulève une certaine complexité puisqu'il existe deux mécanismes de perception visuelle. Les travaux de Goodale et Milner (1992) montrent en effet que les informations visuelles peuvent être traitées par deux voies corticales différentes : la voie ventrale est plutôt impliquée dans la perception pour l'identification des stimuli et la voie dorsale, plutôt impliquée dans la perception spatiale et la

4 Nous nous intéressons aux estimations de distances faites en condition de brouillard par rapport à celles faites en condition de visibilité normale. Nous emploierons donc les termes surestimation et sous-estimation lorsque les distances estimées en condition de brouillard seront respectivement plus grandes et plus petites que celles estimées en condition de visibilité normale.

perception pour l'action. Au regard de cette dichotomie fonctionnelle schématique, la perception de l'interdistance dans le but de réguler l'intervalle relèverait de la vision spatiale dans un but d'action, et ne serait ainsi pas nécessairement corrélée avec l'interdistance estimée (vision pour l'identification) tels que le suggèrent les travaux de Knill (2005) et de Pagano, Grutzmacher, et Jenkins (2001). Cependant, ce point de vue fonctionnel se veut une heuristique de travail pour décrire les processus cérébraux, et divers travaux notamment de neuropsychologie rappellent que le réel est plus contrariant (e.g. McCloskey et al., 1995). Par ailleurs, les travaux mettant en évidence l'utilisation de la voie dorsale pour la vision dans un but d'action, portent généralement sur des actions manuelles réalisées directement avec le bras et la main (e.g. Haffenden, Schiff, & Goodale, 2001 ; Schenk, Schindler, McIntosh, & Milner, 2005). Les choses sont peut-être différentes avec des actions indirectes telles que le contrôle de l'intervalle avec le véhicule suivi : d'une part le véhicule constitue une interface entre la perception et l'action et d'autre part, en situation de suivi de véhicule stable, les durées d'actions sont beaucoup plus longues qu'avec des mouvements du bras. Il est alors envisageable que le conducteur compare l'interdistance perçue avec son interdistance préférentielle afin de savoir s'il doit se rapprocher ou s'éloigner du véhicule suivi.

Par ailleurs, l'information de distance est utilisée pour l'estimation du TTC (Time To Collision). Les travaux de De Lucia (1991, 2004) montrent ainsi que le TTC perçu est plus court lorsque la taille angulaire de l'objet en approche est plus grande. Smeets, Brenner, Trébuchet, et Mestre (1996) montrent même, pour des mouvements dans le plan frontoparallèle, que le jugement du TTC est principalement basé sur le rapport entre la distance perçue et la vitesse perçue. En modifiant le TTC perçu, la distance intervéhiculaire perçue pourrait donc influencer le comportement de suivi de véhicule. De plus, il est possible que la perception de l'intervalle avec le véhicule suivi repose sur une perception de TTC (Lappe et al., 2000 ; Lee, 1976). L'interdistance perçue pourrait donc être utilisée pour la perception de l'intervalle, au moins de façon indirecte.

7.2 Perception de la distance égocentrée

7.2.1 Informations de distance

La théorie la plus communément admise est que la perception des distances égocentrées se fait à partir d'une douzaine d'informations. On peut d'abord classer ces informations en deux catégories : non visuelles et visuelles (Delorme, 1982). Les informations non visuelles sont

Chapitre 2 : Estimation de la distance intervéhiculaire

l'angle de convergence entre les deux yeux et l'accommodation du cristallin. Ces deux informations sont basées sur le retour d'informations musculaires et ne peuvent être utilisées que pour des distances inférieures à deux ou trois mètres (Schiff, 1980). On peut d'autre part effectuer un classement des informations en deux autres catégories : binoculaires et monoculaires. La disparité binoculaire est ainsi une information visuelle binoculaire. Elle est également appelée stéréopsis lorsque l'objet observé est situé à la distance de l'horoptère, i.e. à la distance vers laquelle convergent les deux yeux, et diplopie dans le cas contraire (Delorme, 1982). La disparité binoculaire est basée sur la différence entre les images rétiniennes des deux yeux. La distance jusqu'à laquelle elle peut être utilisée est cependant mal connue. Cette distance serait de l'ordre de 30 m selon Kemeny et Panerai (2003), de l'ordre de 100 m pour des estimations de distances selon Loomis et Kanpp (2003), et de 135 m selon Schiff (1980). Flannagan, Sivak, et Simpson (2001) indiquent par ailleurs que la vision binoculaire n'améliore pas les jugements de distance, pour une gamme de distances allant de 20 à 80 m. De façon corollaire, Roumes, Meehan, Plantier, & Menu (2001) n'observent pas de différence significative entre les distances estimées en vision binoculaire stéréoscopique et vision binoculaire non stéréoscopique, pour une large gamme de distances simulées (15 à 155 m).

Concernant les informations de distance visuelles monoculaires, on peut citer la parallaxe de mouvement qui est basée sur le déplacement relatif des objets dans le champ visuel lors d'un déplacement de l'observateur (Rogers & Graham, 1979). La perspective de mouvement est quant à elle basée sur la vitesse de déplacement de ces objets dans le champ visuel lorsque l'observateur se déplace.

Les autres informations visuelles monoculaires sont regroupées sous le nom d'informations picturales puisque ce sont les seules informations disponibles lorsqu'on regarde un tableau ou une photographie. L'occlusion correspond au recouvrement des objets lointains par les objets plus proches. On peut ensuite citer la taille relative qui revient à comparer la taille angulaire de différents objets présents dans le champ visuel. Il existe de façon similaire l'information de taille familière qui est basée sur le rapport entre la taille angulaire perçue et la taille connue ou supposée des objets. Les travaux de Fitzpatrick, Pasnak, et Tyler (1982) et de Gogel et Da Silva (1987) montrent ainsi l'influence de la familiarité des objets sur la distance perçue. La hauteur dans le champ visuel permet également de connaître la distance d'un objet dans la mesure où celui-ci est d'autant plus élevé dans le champ visuel qu'il est lointain. La hauteur dans le champ visuel peut être mesurée par la déclinaison angulaire sous l'horizon, et

les travaux de Ooi, Wu, et He (2001) montrent clairement l'utilisation de cette information pour la perception de la distance. La perspective linéaire correspond à la convergence visuelle vers le point de fuite des droites physiquement parallèles, et les gradients de texture sont basés sur l'augmentation de la densité de texture avec la distance. Cutting et Vishton (1995) ne considèrent pas la perspective linéaire et les gradients de texture comme des sources d'informations à part entière. Selon eux, elles correspondent à l'association de sources d'informations déjà présentées : taille relative, densité relative et occlusion. Enfin, la perspective aérienne est due à la diffusion de la lumière par les particules de l'atmosphère. La principale conséquence est que plus un objet est lointain, et plus son contraste est faible. La perspective aérienne va également diminuer la netteté des objets, saturer leurs couleurs, et faire apparaître des halos autour des sources lumineuses.

Le classement des informations de distance selon les axes non visuel/visuel et binoculaire/monoculaire porte sur la nature des mécanismes qui permettent la perception de ces informations. Il est également possible de classer les informations de distance du point de vue de leur nature informative. On distingue ainsi les informations de distance absolues, relatives, et ordinales. Les informations absolues peuvent fournir à elles seules une information de distance égocentrique. Selon Thompson et al. (2004), les informations musculaires, ainsi que la perspective linéaire, la hauteur dans le champ visuel et la taille familière sont des informations de distance absolue. Les informations relatives renseignent sur le rapport de distance entre deux objets ou deux positions différentes de la scène. Ainsi, la disparité rétinienne et les gradients de texture nous renseignent uniquement de façon relative, par exemple en comparant la densité de texture entre deux points de la scène. Enfin, les informations ordinales permettent seulement de savoir si la distance d'un objet est plus grande ou plus petite qu'une autre distance. C'est le cas de l'occlusion qui permet uniquement de comparer la distance de deux objets.

De façon similaire, Cutting et Vishton (1995) classent les informations de distance de façon hiérarchique en fonction de leur précision. Ils considèrent ainsi que les informations sont d'autant plus précises qu'elles permettent de discriminer des distances proches. Ils font ainsi référence au seuil différentiel. Selon Cutting et Vishton (1995), l'occlusion est la source d'information la plus précise puisqu'elle permet de déterminer lequel de deux objets est le plus proche, même lorsque ces objets sont très proches l'un de l'autre. Lorsque la distance est supérieure à quelques mètres, les autres informations précises sont la hauteur dans le champ

visuel, la taille relative et la perspective de mouvement. La précision de la hauteur dans le champ visuel diminue cependant lorsque la distance augmente. De même, la perspective de mouvement ne peut être utilisée pour de grandes distances que si la vitesse de déplacement est suffisamment grande. Dans la hiérarchie de précision des informations, vient ensuite la disparité binoculaire dont la précision est d'autant plus petite que la distance est grande. Enfin, la perspective aérienne devient un indice important lorsque les distances sont de plusieurs centaines de mètres. Nous allons voir que le classement des informations de distances en fonction de leur nature informative ou de leur précision est nécessaire à l'élaboration de modèles de fusion de ces informations.

7.2.2 Fusion des informations de distance

Pour percevoir la distance égocentrée d'un objet, le système visuel doit fusionner les différentes informations dont il dispose. Un certain nombre de recherches menées ces dernières années porte sur un modèle de fusion d'informations déduit de la loi de Bayes. Ce modèle appelé *maximum likelihood estimator* par Ernst et Banks (2002), permet d'estimer une grandeur de façon optimale sur le plan statistique. Pour faire cette estimation, le modèle doit connaître la fiabilité des différentes sources d'informations qui correspond à l'inverse de leur variance. La fusion des sources d'informations se fait alors par une moyenne pondérée où les coefficients appliqués à chaque source sont calculés à partir de leur fiabilité. Comme Banks (2004), prenons pour exemple le cas où l'on souhaite fusionner deux informations I_1 et I_2 provenant de deux sources de fiabilité différente (Figure 4). La fiabilité des sources est donnée par $r_1 = \frac{1}{\sigma_1^2}$ et $r_2 = \frac{1}{\sigma_2^2}$, où σ_1^2 et σ_2^2 représentent leur variances respectives.

L'estimation I fournie par le modèle est donnée par : $I = W_1 \cdot I_1 + W_2 \cdot I_2$, avec $W_1 = \frac{r_1}{r_1 + r_2}$ et

$W_2 = \frac{r_2}{r_1 + r_2}$. L'estimation faite par le modèle est plus proche de l'information la plus fiable, i.e.

celle avec la variance la plus faible. De plus, l'estimation est plus fiable que les différentes informations utilisées puisque sa variance est plus faible.

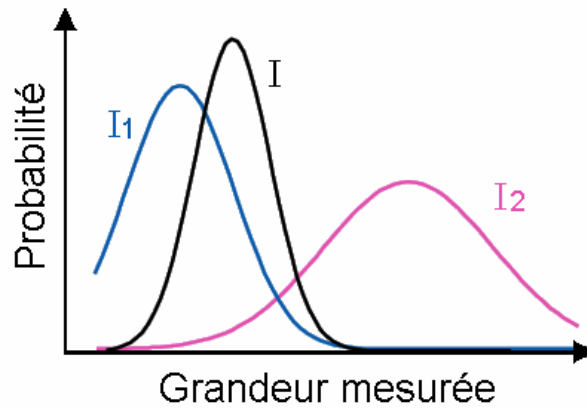


Figure 4 : Fusion I de deux informations I_1 et I_2 , de façon statistiquement optimale, d'après le modèle Bayésien décrit par Banks (2004).

Plusieurs travaux montrent que ce type de modèle fournit une bonne estimation de la grandeur perçue pour des informations sources appartenant à différentes modalités perceptives (Alais & Burr, 2004 ; Banks, 2004 ; Ernst & Banks, 2002), et d'autres le montrent pour des sources appartenant à la modalité visuelle (Adams & Mamassian, 2004 ; Jacobs, 1999). D'autres travaux mettent cependant en évidence les limites des modèles Bayésiens pour la fusion d'informations. Jacobs (1999) et Kerstein, Mamassian, et Yuille (2004) soulignent l'importance des présuppositions des participants, en particulier lorsqu'il s'agit de lever des ambiguïtés. D'autre part, Godfroy, Roumes, et Dauchy (2003), ainsi que van Ee, Adams, et Mamassian (2003) montrent que les informations ne sont pas fusionnées en une perception unique lorsqu'elles diffèrent trop, i.e. lorsqu'elles sont incohérentes. La prise en compte de ce dernier point nous conduit à retrouver les principes énoncés par Cutting et Vishtone (1995). Ils supposent en effet que les informations de distance sont fusionnées de façon quasi-linéaire, au moins en l'absence de conflit, et avec une hiérarchie de domination des différentes sources d'informations qui est fonction de leur fiabilité respective. Nous avons en effet vu que Cutting et Vishtone (1995) classent les informations de distances en fonction de leur fiabilité, mesurée par la plus petite variation de distance qu'elles permettent de déceler.

Landy, Maloney, Johnston, et Young (1995) sont allés plus loin dans la conception d'un modèle spécifique à la perception des distances. Selon leur modèle appelé *modified weak fusion*, il y aurait des interactions et des coopérations entre les différentes sources d'informations. Ce principe de fonctionnement prend tout son sens si l'on considère que les informations relatives et ordinales ne peuvent pas fournir pas à elle seules une mesure de distance. Les auteurs pensent que le système visuel cherche à combiner les informations disponibles de façon linéaire. C'est ce que nous avons vu à travers le modèle Bayésien et le

modèle de Cutting et Vishtone (1995). Au contraire, lorsque les sources d'informations sont incohérentes, le système visuel peut adopter un comportement non linéaire. L'une des informations peut par exemple ne pas être prise en compte si elle diffère trop des autres informations disponibles. Les résultats de van Ee et al. (2003) vont dans ce sens. Jacobs (2002) souligne ainsi que la fiabilité de chaque information ne dépend pas seulement de sa variance comme nous l'avons vu, mais également de sa corrélation avec les autres informations. On peut illustrer ce phénomène par l'illusion de la chambre d'Ames. L'information de la taille familière des deux personnages étant incohérente avec l'ensemble des autres informations, elle est ignorée lorsqu'il s'agit de percevoir la disposition de la pièce. Cette incohérence conduit, par l'utilisation d'heuristiques, à percevoir l'un des personnages beaucoup plus grand que l'autre. Landy et al. (1995) pensent par ailleurs que la fiabilité des sources d'informations est estimée de façon dynamique, en fonction de la situation et de l'objet considéré dans la scène. Par exemple, l'information de hauteur dans le champ visuel ne peut être utilisée que si le terrain est plat.

7.2.3 Autres théories concernant la perception des distances

Nous venons de voir la théorie la plus communément admise concernant la perception des distances, qui est basée sur les différentes informations de distance. Il existe d'autres théories comme par exemple la théorie écologique de Gibson (1979). D'après lui, l'information est perçue directement à partir du flux de lumière, sans qu'il y ait de médiation par une image mentale. Il propose ainsi la "ground theory" où l'agencement de l'environnement est perçu à partir de la relation des surfaces entre elles et avec le sol. Il souligne également certains phénomènes intéressants comme le fait que pour un objet plus haut que l'observateur, la proportion de cet objet vue en dessous l'horizon et au dessus l'horizon est constante, indépendamment de sa distance. Cette proportion dépend uniquement de la taille de l'objet et de l'observateur.

La théorie proposée par Gibson (1979) met en avant l'importance du sol. D'autres auteurs montrent à travers plusieurs expériences que le sol a effectivement une influence sur la perception des distances égocentrées. Sinai, Ooi, et He (1998) montrent ainsi que la distance d'une cible placée sur le sol est sous-estimée lorsque le sol entre l'observateur et la cible est séparé en deux zones de textures différentes. Wu, Ooi, et He (2004) montrent par ailleurs que lorsque le champ de vision de l'observateur est réduit dans le sens vertical, il doit visualiser le sol de ses pieds jusqu'à la cible pour estimer correctement la distance. Enfin, He, Wu, Ooi, et

Wu (2004) montrent que la distance égocentrée d'une cible placée sur le sol est respectivement surestimée ou sous-estimée lorsque le sol présente un trou ou une boîte noire entre l'observateur et la cible, mais que ce biais n'apparaît pas lorsque l'observateur parcourt le sol du regard en contournant l'obstacle. En se basant sur ces différents résultats, He et al. (2004) proposent une théorie qui se base sur un processus d'intégration séquentielle de différentes zones de surface. L'espace compris entre les pieds de l'observateur et la cible serait alors divisé en plusieurs zones. Le jugement d'une distance se ferait par intégration successive de ces différentes zones dans une représentation en commençant par la zone la plus proche, donnant ainsi lieu à une représentation globale de la surface. Selon les auteurs, si le sol proche de l'observateur n'est pas visible alors la première zone utilisée pour la construction de la représentation est à une plus grande distance de l'observateur. Le système visuel peut alors ne pas percevoir correctement l'inclinaison du sol, conduisant à sous-estimer la distance, comme l'on observé Wu et al. (2004).

De leur côté, Yang et Purves (2003) proposent une théorie basée sur les statistiques. Leur théorie peut expliquer un certain nombre de phénomènes tels que la surestimation ou la sous-estimations des distances lorsque le sol présente respectivement un trou ou un plateau entre l'observateur et la cible. D'après les auteurs, l'espace visuel humain serait déterminé par les probabilités et aurait ainsi "appris" les distributions de probabilité mettant en relation la distance d'un objet et sa hauteur dans le champ visuel. Autrement dit, le système visuel aurait intégré que les objets dans le bas du champ visuel sont habituellement proches et que les objets perçus au niveau de l'horizon sont habituellement lointains. Cette théorie permet également d'expliquer le phénomène appelé "equidistance tendency" selon lequel plusieurs objets présents dans le champ visuel ont tendance à être perçus à la même distance. La théorie de Yang et Purves (2003) ne semble cependant pas expliquer l'effet des textures sur le sol observé par Sinai et al. (1998).

7.3 Perception de l'interdistance et brouillard

7.3.1 Influence du brouillard sur les informations de distance

La présence de brouillard a pour conséquence une augmentation importante de l'information de perspective aérienne, qui par l'augmentation de ses effets serait susceptible de conduire à une surestimation des distances. Comme nous l'avons vu, le principal effet de la perspective aérienne est une réduction du contraste des objets lorsque leur distance égocentrée

augmente. Il a par ailleurs été montré lors d'expériences de laboratoire, qu'une réduction du contraste conduit à une augmentation de la profondeur perçue (O'Shea, Blackburn, & Ono, 1994 ; Rohaly, & Wilson, 1999). Selon O'Shea et al. (1994) le contraste d'un objet par rapport au fond est une information de profondeur efficace en l'absence d'autres informations. On peut en effet penser, d'après les mécanismes de combinaison des informations de distance, qu'une information donnée est prise en compte de façon plus importante lorsque les autres informations ne sont pas disponibles. De plus, une information erronée ne peut pas être exclue s'il n'y a pas d'informations fiables auxquelles la comparer. C'est notamment le cas en condition de brouillard dense puisque de nombreuses informations de distance sont indisponibles. L'information erronée de perspective aérienne pourrait alors jouer un rôle important dans l'estimation des distances. C'est ce que l'on retrouve dans les résultats de Ross (1975) qui montre que pour des objets non familiers (dont on ne connaît pas la taille), la distance est surestimée de 100% par temps de brouillard. Dans l'expérience de Ross (1975), peu d'informations de distance étaient disponibles, ce qui peut expliquer l'ampleur de la surestimation observée. En revanche dans le cadre de la conduite automobile, des informations supplémentaires sont disponibles. On peut donc s'attendre à ce que la surestimation de l'interdistance soit moins importante que celle observée par Ross (1975), et qu'elle dépende largement de la quantité d'informations fiables disponibles, i.e. de la visibilité du véhicule suivi et de l'environnement.

Parmi les informations de distance susceptibles d'être disponibles en situation de suivi de véhicule, on peut citer en premier lieu les informations relatives au véhicule. Il s'agit principalement de l'information de taille familière qui peut être basée sur la silhouette du véhicule, sur l'écartement entre les feux de brouillard, ou sur leur taille. La visibilité de la silhouette du véhicule permet de percevoir directement sa taille angulaire. Au contraire lorsque le véhicule n'est vu que par ses feux, il faut inférer sa taille angulaire à partir de l'écartement des feux, ce qui rend plus difficile l'accès à l'information de taille familière. La conséquence est que la distance estimée du véhicule dépend de l'écartement de ses feux, lorsque celui-ci n'est pas connu de l'observateur (Buchner, Brandt, Bell, & Weise, 2006 ; Castro, Martinez, Tornay, Fernandez, & Martos, 2005 ; Cavallo, Colomb, & Doré, 2001). Il y a également l'information de hauteur dans le champ visuel relative au véhicule ou à ses feux. Bien que Cavallo et al. (2001) ne l'ait pas observé, il semblerait que la distance estimée soit plus grande lorsque les feux sont placés plus haut au dessus du sol (Buchner et al., 2006). D'autres indices tels que la luminosité des feux, ainsi que la taille et la luminosité des halos

peuvent nous renseigner sur la distance du véhicule. Parmi les informations liées à l'environnement, nous pouvons citer les gradients de texture qui sont liés à la chaussée et aux éléments répétitifs tels que les marquages et les arbres, ainsi que la perspective linéaire basée par exemple sur les bords de route ou sur les lignes de marquage. L'information de taille familière est également utilisable pour les éléments de l'environnement. Lorsqu'elles sont disponibles, ces différentes informations peuvent participer à une estimation précise de l'interdistance, conduisant à une surestimation moins importante que celle observée par Ross (1975), voire à rétablir une estimation correcte des interdistances.

7.3.2 *Expériences réalisées antérieurement*

Plusieurs expériences ont été menées afin d'étudier l'estimation de la distance intervéhiculaire en condition de brouillard. Certaines de ces expériences ont été menées en salle de brouillard (Cavallo, Colomb, & Doré, 2000, 2001). Il s'agit d'une salle dans laquelle du brouillard artificiel est injecté de façon à obtenir la densité de brouillard voulue. Les dimensions réduites de cette salle impliquent l'utilisation d'un brouillard très dense (DVM comprise entre 5 et 10 m), ainsi que des conditions statiques d'observation, i.e. avec l'observateur immobile et le véhicule cible à l'arrêt. Les participants devaient estimer en mètres la distance qui les séparaient du véhicule placé devant eux, et vu de l'arrière. Les résultats montrent que les participants surestiment les distances de 60% en condition de brouillard nocturne et de 25% en condition de brouillard diurne lorsque la silhouette du véhicule n'est pas visible. En condition de jour et pour la distance la plus courte (5 m) il a également été possible de réaliser des essais lorsque la silhouette du véhicule était visible. L'absence de surestimation pour cette condition serait due selon les auteurs, à une perception directe de la taille angulaire du véhicule donnant un accès direct à l'information de taille familière. Il semblerait également que la visibilité d'un tronçon de chaussée devant le véhicule de l'observateur donne accès aux gradients de texture et permette ainsi de réduire la surestimation (Cavallo, Caro, Doré, Colomb, & Dumont, 2007). La surestimation avec un tronçon de chaussée visible ne serait que de 11% en condition de nuit avec un brouillard très dense (DVM > 12 m).

Une expérience réalisée sur simulateur (Cavallo, Dumont, & Gallée, 2002) avec la même méthode que les expériences réalisées en salle de brouillard (Cavallo et al., 2000, 2001) a permis de retrouver en condition de jour la surestimation des distances lorsque seuls les feux du véhicule cible sont visibles, et l'absence de surestimation lorsque sa silhouette et la

chaussée le sont également. Cette reproduction des résultats qui avaient été obtenus en salle de brouillard a permis de valider le brouillard simulé en condition diurne. Ce brouillard simule l'atténuation des contrastes en fonction de la distance et a été amélioré de façon à reproduire les halos apparaissant autour des feux. La surestimation est néanmoins plus importante sur simulateur qu'en salle de brouillard. Deux autres expériences (Cavallo, Doré, & Colomb, 1999) n'avaient pas montré d'effet de la condition de visibilité lorsque la silhouette du véhicule et la chaussée étaient visibles. Celles-ci avaient été réalisées avec des brouillards de faible ou moyenne densité (DVM comprise entre 50 et 100 m) et avec les feux de brouillards éteints.

Par ailleurs, une autre expérience réalisée avec un environnement simulé a également montré l'influence du brouillard sur l'estimation de l'interdistance (Buchner et al., 2006). Les résultats montrent que l'interdistance estimée est d'autant plus grande que le brouillard est dense, mais uniquement pour les deux plus courtes interdistances testées, i.e. 40 et 50 m. D'après les auteurs, la silhouette du véhicule était visible pour l'interdistance de 40 m. Au contraire, aucune influence de la densité du brouillard sur les estimations n'est apparue pour la plus grande interdistance qui était de 60 m. Nous reviendrons plus loin sur cette absence d'effet.

Il semblerait selon les expériences exposées ci-dessus qu'une surestimation des distances apparaisse en condition de brouillard très dense lorsque ni la silhouette du véhicule cible ni la chaussée ne sont visibles. Bien que l'influence de la silhouette et de la chaussée n'aient pas été étudiées séparément sur simulateur, il semblerait que ces résultats soient reproductibles avec un brouillard simulé en condition diurne. Buchner et al. (2006) ont néanmoins montré un effet de la densité du brouillard lorsque la silhouette était visible. On peut penser que la visibilité de la silhouette a diminué à mesure que le brouillard était plus dense (mais nous ne savons pas dans quelle mesure), ce qui expliquerait les estimations plus grandes. Contrairement à cet ensemble de résultats, une autre expérience (Beaudoin, 2002) montre une sous-estimation des interdistances en condition de brouillard, en particulier lorsque la silhouette du véhicule cible n'est pas visible.

7.3.3 Différences méthodologiques des expériences aux résultats contradictoires

L'expérience de Beaudoin (2002), et l'expérience de Cavallo et al. (2002) qui avait permis de valider le brouillard simulé en condition de jour, ont toutes les deux été réalisées sur

simulateur de conduite. Ces deux expériences présentent néanmoins un certain nombre de différences méthodologiques (Tableau 1, page 45).

a. Environnement

Une première différence est l'environnement virtuel utilisé, qui pour l'expérience de Cavallo et al. (2002) comportait une chaussée texturée ainsi que des bâtiments et des arbres constituant un environnement structuré et fermé puisqu'il empêchait l'observateur de voir l'horizon. Au contraire, l'environnement utilisé par Beaudoin (2002) ne comportait qu'une chaussée texturée et des arbres sur le bas-côté lui donnant un caractère plus ouvert. Teghtsoonian et Teghtsoonian (1969, 1970) ont montré que les distances estimées ne sont pas les mêmes dans un environnement intérieur et dans un environnement extérieur, qui diffèrent par leur degré d'ouverture. En effet, lorsque les distances estimées sont ajustées à une loi de Stevens ($R=k.S^n$), l'exposant n est plus petit pour l'environnement extérieur que pour l'environnement intérieur. La valeur de cet exposant affecte en particulier les grandes distances ; et un exposant petit signifie (pour ces grandes distances) que la distance perçue est petite par rapport à la distance réelle. Les interdistances estimées pourraient donc être plus courtes (pour les grandes interdistances) dans l'environnement utilisé par Beaudoin (2002), au moins en condition de visibilité normale. On peut au contraire s'attendre à ce que l'environnement n'ait pas d'influence en condition de visibilité réduite puisqu'il est masqué par le brouillard. Cette hypothèse va cependant dans le sens inverse des résultats que l'on cherche à expliquer. Par ailleurs, l'une des expériences réalisées par Cavallo et al. (1999) utilisait trois environnements de complexités différentes, et n'avait pas fait apparaître d'influence de l'environnement. On peut donc supposer que le caractère ouvert ou fermé de l'environnement n'explique par les résultats contradictoires de Cavallo et al. (2002) et Beaudoin (2002).

b. Véhicule cible

Par ailleurs, les véhicules cibles utilisés n'étaient pas les mêmes pour les deux expériences. Pour l'expérience de Cavallo et al. (2002) il s'agissait d'un véhicule léger avec un seul ou deux feux de brouillard, alors que pour l'expérience de Beaudoin (2002), le véhicule comportait toujours deux feux. Le deuxième feu donne accès à l'information de taille familière lorsque la silhouette du véhicule n'est pas visible, ce qui permet de percevoir plus précisément l'interdistance. Une surestimation moins importante avait effectivement été observée en salle de brouillard pour le véhicule ayant deux feux que pour celui n'en ayant qu'un (Cavallo et al., 2000, 2001). Cette seconde différence pourrait uniquement conduire à

une surestimation plus faible pour l'expérience de Beaudoin (2002). Les deux véhicules utilisés différaient également par leur couleur. Celui utilisé par Cavallo et al. était de couleur blanche alors que celui utilisé par Beaudoin était plus sombre. Cette différence de couleur n'a pas d'influence notable sur la valeur absolue du contraste mais une éventuelle influence du signe du contraste ne peut pas être exclue.

c. Couleur du brouillard

Une troisième différence est la couleur du brouillard simulé, qui était plus sombre pour l'expérience de Beaudoin (2002) que pour celle de Cavallo et al. (2002). Avec un brouillard plus sombre, le contraste entre les feux et le fond est plus important. En partant du principe que les estimations sont plus petites lorsque le contraste est plus fort, cette différence devrait conduire à des distances estimées plus courtes pour l'expérience de Beaudoin (2002) lorsque les estimations sont basées sur les feux, i.e. lorsque la silhouette est masquée. Cette hypothèse peut être appuyée par les résultats de Cavallo et al. (2002) qui montrent une surestimation des interdistances lorsque la silhouette est masquée en condition de jour, pour laquelle le brouillard est clair, et ne montrent pas d'effet du brouillard en condition de nuit où le brouillard est très sombre. En revanche lorsque la silhouette du véhicule est visible, la couleur du brouillard n'influence le contraste que lorsque la silhouette du véhicule est plus claire que le brouillard. Lorsque c'est le cas, le contraste est plus fort pour le brouillard sombre, ce qui devrait conduire à des estimations plus courtes de l'interdistance. Cette troisième différence méthodologique pourrait donc conduire à une surestimation plus faible pour l'expérience de Beaudoin (2002).

d. Densité du brouillard

D'autre part, le brouillard était moins dense pour l'expérience de Beaudoin (2002) que pour celle de Cavallo et al. (2002) puisque sa densité était calculée en fonction de l'interdistance dans le but de garder un contraste constant entre le véhicule cible et le fond. Il en résulte une meilleure visibilité de l'environnement pour l'expérience de Beaudoin (2002) que pour celle de Cavallo et al. (2002). Ainsi, la chaussée donnant accès aux gradients de textures, était visible en même temps que la silhouette pour l'expérience de Cavallo et al. (2002) alors qu'elle était visible pour toutes les conditions pour celle de Beaudoin (2002). Les arbres bordant la route qui donnent accès à l'information de taille relative étaient également visibles pour les plus grandes interdistances dans l'expérience de Beaudoin (2002). Les informations de distance fournies par l'environnement pourraient donc expliquer l'absence de

surestimation pour l'expérience de Beaudoin (2002), mais ne peuvent pas expliquer la sous-estimation observée.

e. Gamme d'interdistances

Parmi les différences énoncées ci-dessus, trois sont susceptibles d'expliquer une surestimation faible ou absente pour l'expérience de Beaudoin (2002) : le nombre de feux de brouillard, la couleur du brouillard, et la densité du brouillard. Ces différences ne peuvent cependant pas expliquer la sous-estimation des interdistances en condition de brouillard. Deux autres différences sont au contraire susceptibles d'expliquer cette sous-estimation. La première est la gamme des interdistances étudiées. Elle était comprise entre 5 et 13 m pour l'expérience de Cavallo et al. (2002) et entre 12 et 61 m pour l'expérience de Beaudoin (2002). Les travaux de Da Silva (1985) et de Teghtsoonian et Teghtsoonian (1970) montrent que la gamme des distances étudiées peut avoir une influence sur la distance perçue. Lorsque la distance perçue est ajustée à une loi de Stevens (cf. supra), l'exposant n est plus petit lorsque la gamme des distances étudiées est étendue. Da Silva (1985) fait par ailleurs le lien entre ce résultat et le fait que les principales informations de distance soient moins disponibles pour les plus grandes distances. On peut donc supposer que ce phénomène est plus prononcé en condition de brouillard où peu d'informations de distance sont disponibles. Cette hypothèse pourrait donc expliquer la sous-estimation des interdistances en condition de brouillard observée par Beaudoin (2002). Même s'ils ne vont pas dans le sens d'une sous-estimation, les résultats de Buchner et al. (2006) soutiennent cette hypothèse. Ils avaient en effet montré des estimations de l'interdistance d'autant plus grandes que le brouillard était dense pour des interdistances de 40 et 50 m, mais n'avaient en revanche pas montré d'effet pour la plus grande interdistance qui était de 60 m.

f. Simulation statique vs. dynamique

La seconde différence méthodologique susceptible d'expliquer la sous-estimation des interdistances observée par Beaudoin (2002) est le caractère statique ou dynamique de la simulation. Pour l'expérience de Cavallo et al. (2002) réalisée en condition statique, l'observateur et le véhicule cible étaient immobiles. Au contraire, pour l'expérience de Beaudoin (2002) réalisée en condition dynamique, le véhicule cible roulait à vitesse constante et était suivi par le véhicule de l'observateur avec une interdistance constante. On notera que les deux expériences de Cavallo et al. (1999) avaient été réalisées en condition statique pour l'une et en condition dynamique pour l'autre, et aucune des deux expériences n'avait montré

d'influence du brouillard sur l'estimation des distances. Le caractère statique ou dynamique de la simulation pourrait donc ne pas influencer l'estimation des interdistances. Pourtant, Pretto, Vidal, et Chatziastros (2008) montrent que la vitesse propre perçue est plus grande en présence de brouillard, et plusieurs travaux montrent que les distances et interdistances estimées sont d'autant plus courtes que la vitesse propre (réelle) est élevée (Harte, 1975 ; Ohta, 1996). En supposant que la vitesse perçue puisse également avoir une influence sur l'estimation des interdistances, le brouillard interagirait avec la vitesse propre. Cette interaction conduirait à des estimations de l'interdistance plus courtes en condition de brouillard qu'en condition de visibilité normale lorsque le véhicule est en mouvement. Ce phénomène pourrait donc expliquer la sous-estimation observée par Beaudoin (2002).

| Paramètres | Expérience : Cavallo et al. (2002) | Expérience : Beaudoin (2002) | Informations de distance impliquées, ou phénomène concerné |
|---|---|---|---|
| Environnement | Complexe | Simple | Caractère fermé/ouvert, effet sur l'exposant de la loi de Stevens |
| Nombre de feux de brouillard | 1 ou 2 feux | 2 feux | Information de taille familière lorsque la silhouette n'est pas visible |
| Couleur du véhicule cible | Claire | Plus sombre | Contraste silhouette/fond |
| Couleur du brouillard | Claire | Sombre | Contraste feux/fond et silhouette/fond |
| Densité du brouillard | Très dense (3m<DVM<13m) | Dense (8m<DVM<70m) | Gradients de textures liés à la chaussée, information de taille relative |
| Gamme d'interdistances | 5 à 13 m | 12 à 61 m | Effet sur l'exposant de la loi de Stevens |
| Simulation | Statique | Dynamique | Influence indirecte à travers la vitesse perçue |

Tableau 1 : Différences méthodologiques entre l'expérience de Cavallo et al. (2002) ayant montré une surestimation des interdistances lorsque le brouillard permet uniquement de voir les feux de brouillard du véhicule cible conformément aux expériences réalisées en salle de brouillard, et l'expérience de Beaudoin (2002) ayant montré une sous-estimation des interdistances en condition de brouillard.

7.4 Hypothèses

Nous cherchons à connaître plus précisément les conditions faisant apparaître une surestimation des distances en condition de brouillard, dangereuse en termes de sécurité

routière. Les expériences de Cavallo et al. (2002) et de Beaudoin (2002) ont montré pour l'une une surestimation des interdistances conformément aux résultats obtenus en salle de brouillard, et pour l'autre une sous-estimation des interdistances. Nous cherchons à savoir si cette différence de résultats peut être expliquée par les différences méthodologiques des deux expériences.

Nous avons choisi d'étudier les paramètres liés à la validité et à la reproductibilité des résultats obtenus par Cavallo et al. (2002), à savoir : le type d'environnement, le nombre de feux de brouillards, la couleur du véhicule cible, et la couleur du brouillard. L'influence de ces paramètres est étudiée dans l'expérience 1 présentée ci-dessous. Comme nous l'avons vu, nous nous attendons à ce que ces paramètres puissent moduler la surestimation des interdistances en condition de brouillard. Nous n'attendons en revanche aucune sous-estimation causée par ces paramètres.

L'influence des trois autres paramètres sera abordée avec la seconde expérience. Il s'agit de la densité du brouillard, de la gamme des interdistances étudiées, et du caractère statique ou dynamique de la simulation. D'après ce qui a été vu ci-dessus, un brouillard léger semble uniquement conduire à une estimation plus précise des interdistances, i.e. à réduire ou supprimer la surestimation. En revanche, il est possible qu'une grande gamme d'interdistances ou qu'une simulation dynamique conduise à sous-estimer les interdistances en condition de visibilité réduite.

8 Expérience 1

8.1 Méthode

8.1.1 *Participants*

Seize participants (neuf hommes et sept femmes) ayant entre 22 et 40 ans, ont participé à l'expérimentation. Ils étaient titulaires du permis de conduire depuis au moins deux ans et

avaient une vision normale ou corrigée à la normale, conformément au Code de la Route français⁵.

8.1.2 Matériel

L'expérience a été réalisée sur le simulateur de conduite de l'INRETS. Le système d'affichage composé d'un écran plat de 2.7 m de largeur et 2.2 m de hauteur permettait un angle de vision de 50° dans le sens horizontal et de 45° dans le sens vertical. Les yeux des participants étaient situés à 1.2 m au dessus du sol, et à une distance de 2.7 m de l'écran. La résolution des images projetées était de 1024x768 pixels pour chaque écran. La scène simulée était en condition diurne, et le brouillard était simulé par une fonction OpenGL produisant une atténuation exponentielle du contraste en fonction de la distance. La prise en compte de la diffusion de la lumière a permis d'améliorer cette fonction en simulant les halos apparaissant autour des feux (Dumont & Cavallo, 2004).

8.1.3 Conditions expérimentales

Pendant l'expérience, un véhicule léger simulé (véhicule cible) était vu de l'arrière. Nous avons utilisé cinq variables indépendantes qui étaient la condition de visibilité, l'interdistance avec le véhicule cible, la configuration des feux de brouillard du véhicule cible, l'environnement, et la couleur du brouillard simulé.

Trois conditions de visibilité ont été utilisées (Figure 5) : une condition de visibilité normale nommée *sans brouillard*, une condition de visibilité réduite nommée *brouillard silhouette* pour laquelle le contraste entre la silhouette du véhicule cible et le fond était de 8%⁶, et une condition de visibilité réduite nommée *brouillard feux* pour laquelle le véhicule cible n'était vu que par ses feux de brouillard (contraste silhouette-fond < 0.7%). La condition

⁵ Arrêté du 21 décembre 2005 fixant la liste des affections médicales incompatibles avec l'obtention ou le maintien du permis de conduire : Incompatibilité si l'acuité binoculaire est inférieure à 5/10. Si un des deux yeux a une acuité visuelle nulle ou inférieure à 1/10, il y a incompatibilité si l'autre oeil a une acuité visuelle inférieure à 6/10. Incompatibilité si le champ visuel binoculaire horizontal est inférieur à 120° (60° à droite et à gauche de l'axe visuel) ou champ visuel vertical inférieur à 60° (30° au-dessus et au-dessous de l'axe visuel). Incompatibilité de toute atteinte notable du champ visuel du bon oeil si l'acuité d'un des deux yeux est nulle ou inférieure à 1/10. Avis spécialisé.

⁶ Il s'agit de la valeur absolue du contraste, où le contraste C entre le véhicule de luminance L_v et le fond de luminance L_f est donné par : $C = (L_v - L_f) / L_f$.

Chapitre 2 : Estimation de la distance intervéhiculaire

de visibilité affecte également la visibilité de l'environnement (cf. ci-dessous). Nous avons utilisé cinq interdistances différentes en condition de brouillard : 5, 7, 9, 11, et 13 m, ainsi que quatre distances supplémentaires en condition de visibilité normale : 18, 27, 40, et 61 m. Elles correspondaient à la distance simulée entre l'œil du participant et le pare-choc arrière du véhicule cible. Le contraste du véhicule cible par rapport au fond dépend de sa distance et de la densité du brouillard. Nous avons donc calculé la densité du brouillard en fonction de la condition de visibilité, i.e. le contraste souhaité du véhicule cible par rapport au fond, et en fonction de sa distance. Le Tableau 2 présente la densité du brouillard utilisée pour les différentes conditions expérimentales (sous la forme de la Distance de Visibilité Météorologique). Nous venons de voir que la densité du brouillard dépend de la condition de visibilité et de l'interdistance. La visibilité de l'environnement dépend donc également de ces deux variables. Ainsi, la chaussée était visible pour la condition de visibilité *brouillard silhouette*, mais elle était très peu visible pour la plus courte distance. En revanche pour la condition de visibilité *brouillard feux*, la chaussée était masquée, sauf pour la plus grande distance pour laquelle elle était légèrement perçue.

| Distance Œil – pare-choc (m) | Distance de Visibilité Météorologique (m) | |
|---------------------------------|---|-----------------|
| | Brouillard silhouette | Brouillard feux |
| 5 | 6 | 3 |
| 7 | 8 | 4 |
| 9 | 11 | 5 |
| 11 | 13 | 6 |
| 13 | 16 | 7 |

Tableau 2 : Densités de brouillard (sous la forme de la Distance de Visibilité Météorologique) utilisées pour chaque distance intervéhiculaire (distance œil à pare-choc), en fonction de la condition de visibilité.

Le véhicule cible était un véhicule léger, et avait deux configurations possibles de feux de brouillard. Il pouvait avoir soit un seul feu placé à gauche, soit deux feux de brouillard. En revanche en condition sans brouillard les feux n'étaient pas allumés.

Deux environnements différents ont été utilisés. L'un (celui utilisé par Cavallo et al., 2002) était complexe puisqu'il possédait une chaussée texturée ainsi que des bâtiments et des arbres empêchant l'observateur de voir l'horizon. Le second environnement était plus simple puisqu'il ne comportait qu'une chaussée texturée de 7 m de large et une texture verte simulant l'herbe sur les côtés. Par ailleurs, le véhicule associé à l'environnement complexe était de couleur blanche alors que celui associé à l'environnement simple était de couleur noire. Notons que le véhicule associé à l'environnement complexe avait les deux feux de brouillard

plus écartés et plus hauts que le véhicule associé à l'environnement simple. Dans les deux cas, le véhicule cible était immobile et vu de l'arrière. Enfin, l'expérience a été réalisée avec deux brouillards simulés qui différaient par leur couleur de fond correspondant à un niveau de gris. Le premier était un brouillard clair ayant été utilisé pour l'expérience de Cavallo et al. (2002), alors que le second était un brouillard sombre utilisé pour les expériences de Beaudoin (2002). Pour la présente expérience, nous avons utilisé trois associations entre l'environnement et la couleur du brouillard (aux quelles nous nous référerons en tant qu'associations environnement-couleur_brouillard). Il s'agit d'une part de l'association utilisée par Cavallo et al. (2002) entre l'environnement complexe et le brouillard clair que nous appellerons association *complexe-clair*. La seconde est celle utilisée par Beaudoin (2002) entre l'environnement simple et le brouillard sombre que nous appellerons association *simple-sombre*. Enfin nous avons utilisé une troisième association entre l'environnement simple et le brouillard clair dans le but de différencier l'influence de l'environnement de celle de la couleur du brouillard. Nous appellerons cette dernière association *simple-clair*.

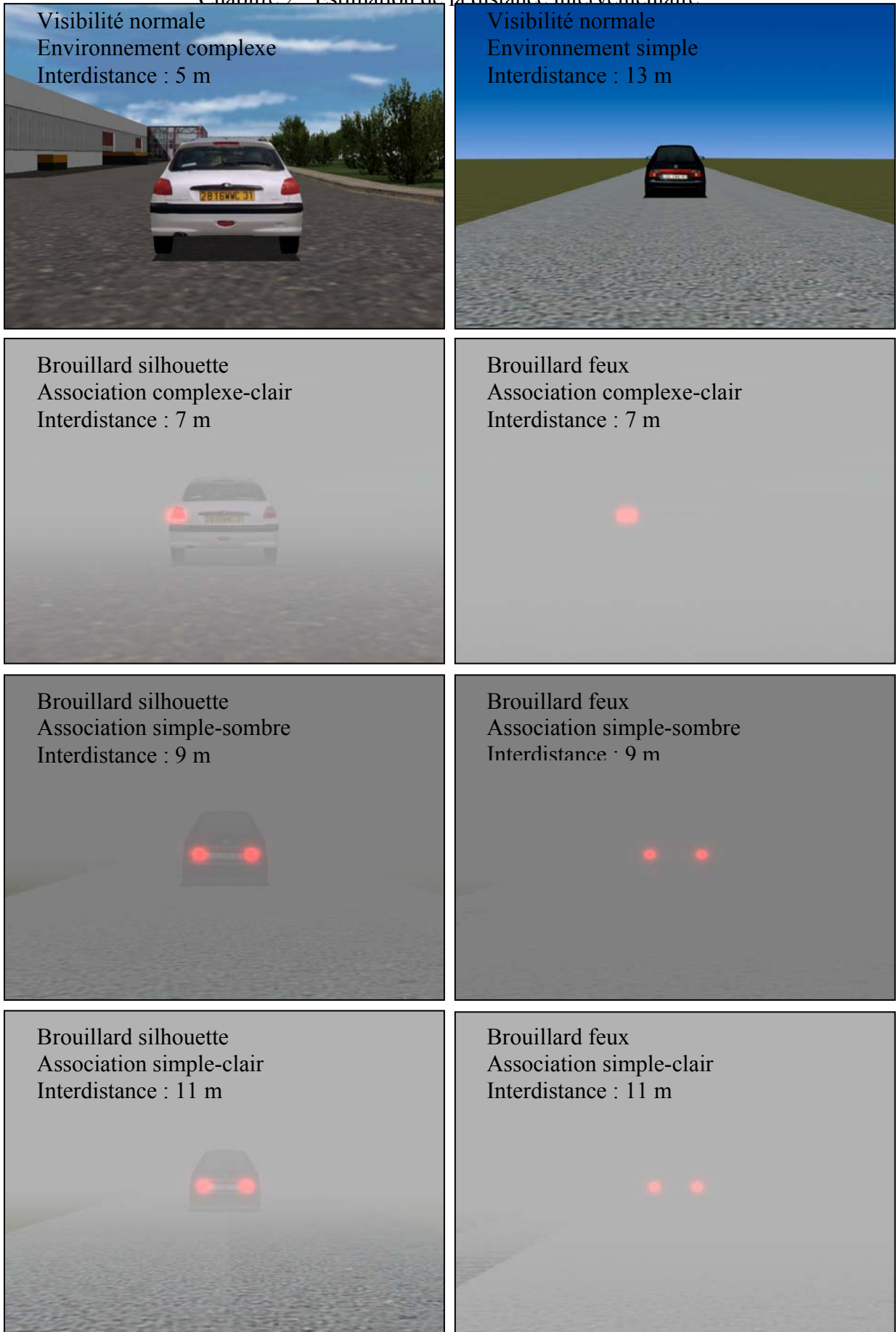


Figure 5 : Captures de l'écran du simulateur. La condition de visibilité et l'association environnement-couleur_brouillard sont indiqués sur chaque image.

8.1.4 Tâche

La tâche des participants consistait à faire une estimation en mètres de la distance entre eux-mêmes (leurs yeux) et le véhicule simulé, projeté sur l'écran. Il était leur demandé d'estimer la distance aussi précisément que possible, puis d'écrire leur réponse sur le formulaire de réponse à la fin de chaque essai. Aucun feedback ne leur était communiqué. La consigne qui était donnée aux participants est présentée en Annexe 1, page 260.

8.1.5 Procédure

Les participants ont d'abord lu la feuille d'information (Annexe 1, page 259) et signé le formulaire de consentement éclairé. Leur vue a ensuite été vérifiée à l'aide d'un appareil Ergovision. Ils se sont ensuite installés dans le véhicule du simulateur à la place conducteur. Les participants ont ensuite passé un bloc de familiarisation à la tâche d'estimation de l'interdistance composé de cinq essais représentatifs de l'ensemble des conditions étudiées.

L'expérience à proprement parler était composée de 78 essais. Chaque condition expérimentale a été présentée une fois. Il y avait une partie sans brouillard et une partie avec brouillard qui ont été contrebalancées. La partie sans brouillard était composée de 18 essais correspondant à la combinaison des neuf interdistances et des deux environnements présentés dans deux blocs distincts. La partie avec brouillard était composée de 60 essais correspondant à la combinaison des deux conditions de visibilité réduite, des cinq interdistances, des deux configurations de feux, et des trois associations environnement-couleur_brouillard. Les trois associations environnement-couleur_brouillard ont été présentées dans des blocs séparés. Les deux blocs de la partie sans brouillard et les trois blocs de la partie brouillard ont d'abord été contrebalancés selon l'environnement (complexe ou simple), puis les deux associations environnement-couleur_brouillard ayant l'environnement simple ont été contrebalancées selon la couleur de leur brouillard (clair ou sombre). Le contrebalancement des différents blocs a ainsi donné huit ordres différents. Chacun des trois blocs de la condition brouillard était composé de 20 essais correspondant à la combinaison de deux conditions de visibilité, des cinq distances, et des deux configurations de feux. Chaque bloc était composé de deux sous-blocs, correspondant aux deux conditions de visibilité. L'ordre des deux sous-blocs était contrebalancé. La moitié des participants a donc eu l'ordre *brouillard silhouette* puis *brouillard feux*, et l'autre moitié a eu l'ordre inverse. Les dix essais composant chaque sous-bloc ont été présentés dans un ordre aléatoire prédéterminé. L'ordre de passation des différents

blocs par les participants est présenté en Annexe 2 (page 262). L'expérimentation se terminait par un questionnaire post-expérimental (Annexe 1, page 261).

Pour chaque essai, l'environnement simulé comportant le véhicule cible était présenté pendant huit secondes. A la fin de cette durée, une image ne comportant ni véhicule ni route était projetée pendant une durée minimale de trois secondes. La projection de cette image avait pour but d'attirer le regard des participants vers différentes zones de l'écran afin d'éviter une stratégie reposant exclusivement sur la comparaison essai par essai de la taille angulaire du véhicule et de sa hauteur dans le champ visuel. Les participants devaient inscrire la distance estimée sur la feuille de réponse. Ils prévenaient l'expérimentateur lorsqu'ils étaient prêts, afin de démarrer l'essai suivant.

8.2 Résultats de l'expérience 1

La distribution des estimations de distance étant log-normale, nous avons utilisé le logarithme de l'interdistance estimée comme variable dépendante pour les analyses décrites ci-dessous. Lorsque l'hypothèse H_0 est rejetée, les tests post-hoc de Newman-Keuls et le calcul de la taille d'effet relative (η^2 partiel) complètent les analyses. La taille d'effet relative correspond à la proportion de variance expliquée, par rapport à la variance non prise en compte par l'ensemble des autres effets et interactions. La combinaison des variables indépendantes ne permet pas de traiter les données dans leur ensemble. Nous avons donc procédé à trois analyses partielles.

8.2.1 Analyse portant sur les essais réalisés en condition de brouillard

La première analyse porte sur l'ensemble des essais réalisés en condition de brouillard, la condition de visibilité normale étant exclue. Il s'agit d'une analyse de variance à mesures répétées 2 x 5 x 2 x 3 (Condition de visibilité x Interdistance x Configuration des feux de brouillard x Association environnement-couleur_brouillard).

a. Effets principaux

Cette analyse met en évidence un effet principal de la condition de visibilité ($F(1,15)=6.08$; $p<.05$; $\eta^2=.288$) montrant que les estimations sont plus importantes pour la condition *brouillard feux* ($m=5.52$; $\sigma=4.07$) que pour la condition *brouillard silhouette* ($m=4.78$; $\sigma=3.41$) (Figure 6-haut). Il y a également un effet de l'interdistance ($F(4,60)=127.5$; $p<.0001$;

$\eta^2=.895$) dans le sens d'estimations plus grandes pour les grandes interdistances (Figure 6-bas-gauche). Les tests post-hoc montrent que toutes les conditions diffèrent significativement ($p<.05$). Les estimations sont respectivement de 2.34, 3.60, 5.08, 6.89, et 7.84 m avec des écarts type de respectivement 1.20, 1.81, 2.87, 4.14, et 4.52 pour les interdistances de 5, 7, 9, 11, et 13 m. L'analyse met également en évidence un effet du nombre de feux de brouillard ($F(1,15)=7.32$; $p<.025$; $\eta^2=.328$) dans le sens d'estimations plus importantes lorsque le véhicule n'a qu'un feu de brouillard ($m=5.24$; $\sigma=3.77$) que lorsqu'il en a deux ($m=5.07$; $\sigma=3.77$) (Figure 6-bas-droite).

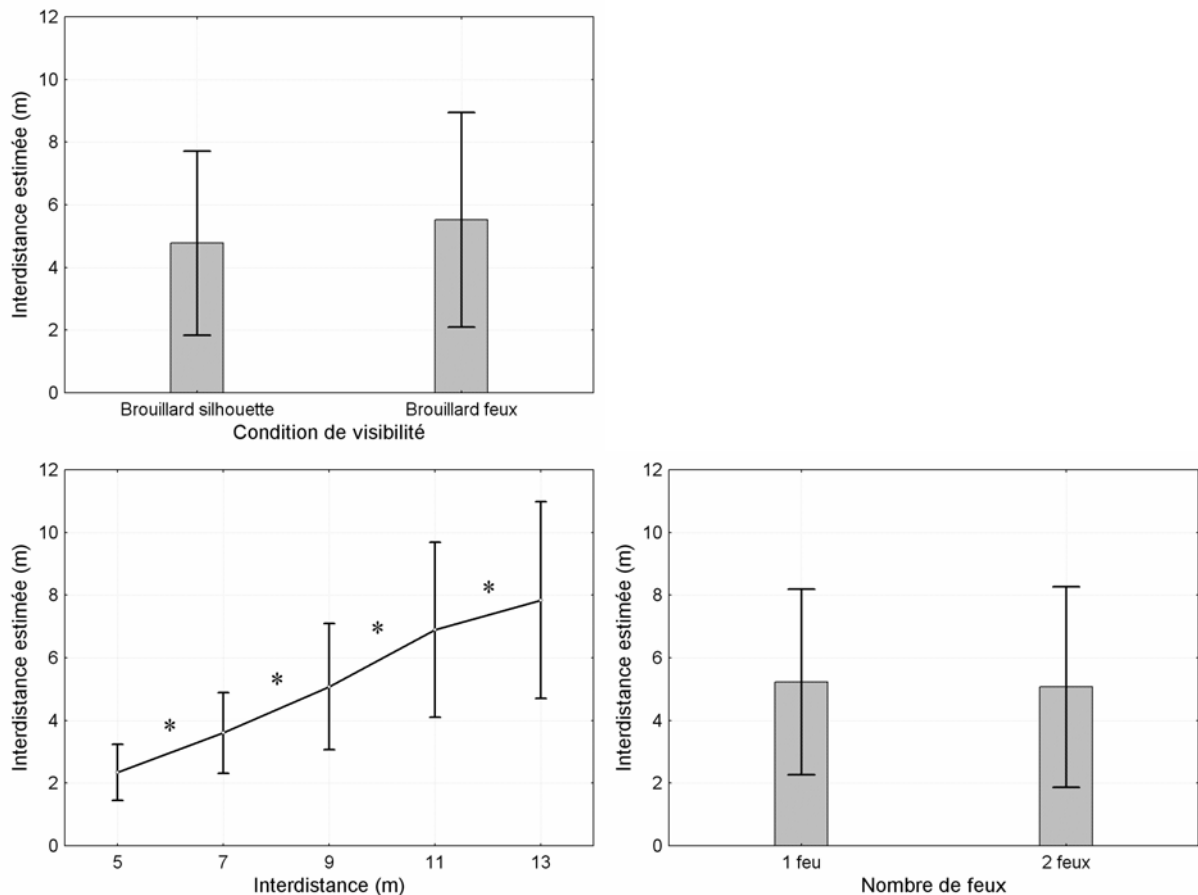


Figure 6 : Haut : Distance estimée en fonction de la condition de visibilité. Bas-gauche : Distance estimée en fonction de l'interdistance. Bas-droite : Distance estimée en fonction du nombre de feux de brouillard. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

b. Interactions

L'analyse portant sur les essais en condition de brouillard montre une interaction entre le nombre de feux de brouillard et l'association environnement-couleur_brouillard ($F(2,30)=5.85$; $p<.01$; $\eta^2=.281$) (Figure 7-haut). Les tests post-hoc indiquent ($p<.0025$) que pour

l'association complexe-clair, les distances estimées sont plus importantes avec un seul feu de brouillard ($m=5.44$; $\sigma=4.29$) qu'avec deux ($m=4.88$; $\sigma=3.76$), alors que ce n'est pas le cas pour les deux autres associations d'environnement et de couleur de brouillard. Par ailleurs, les distances estimées sont plus courtes pour l'association simple-clair ($m=4.73$; $\sigma=2.75$) que pour les deux autres associations ($m=5.44$; $\sigma=4.29$ pour complexe-clair ; et $m=5.54$; $\sigma=4.04$ pour simple-sombre) lorsqu'il n'y a qu'un feu de brouillard ($p<.025$), et elles sont plus longues pour l'association simple-sombre ($m=5.37$; $\sigma=3.97$) que pour les deux autres ($m=4.88$; $\sigma=3.76$ pour complexe-clair ; et $m=4.95$; $\sigma=3.58$ pour simple-clair) lorsqu'il y a deux feux de brouillard ($p<.01$).

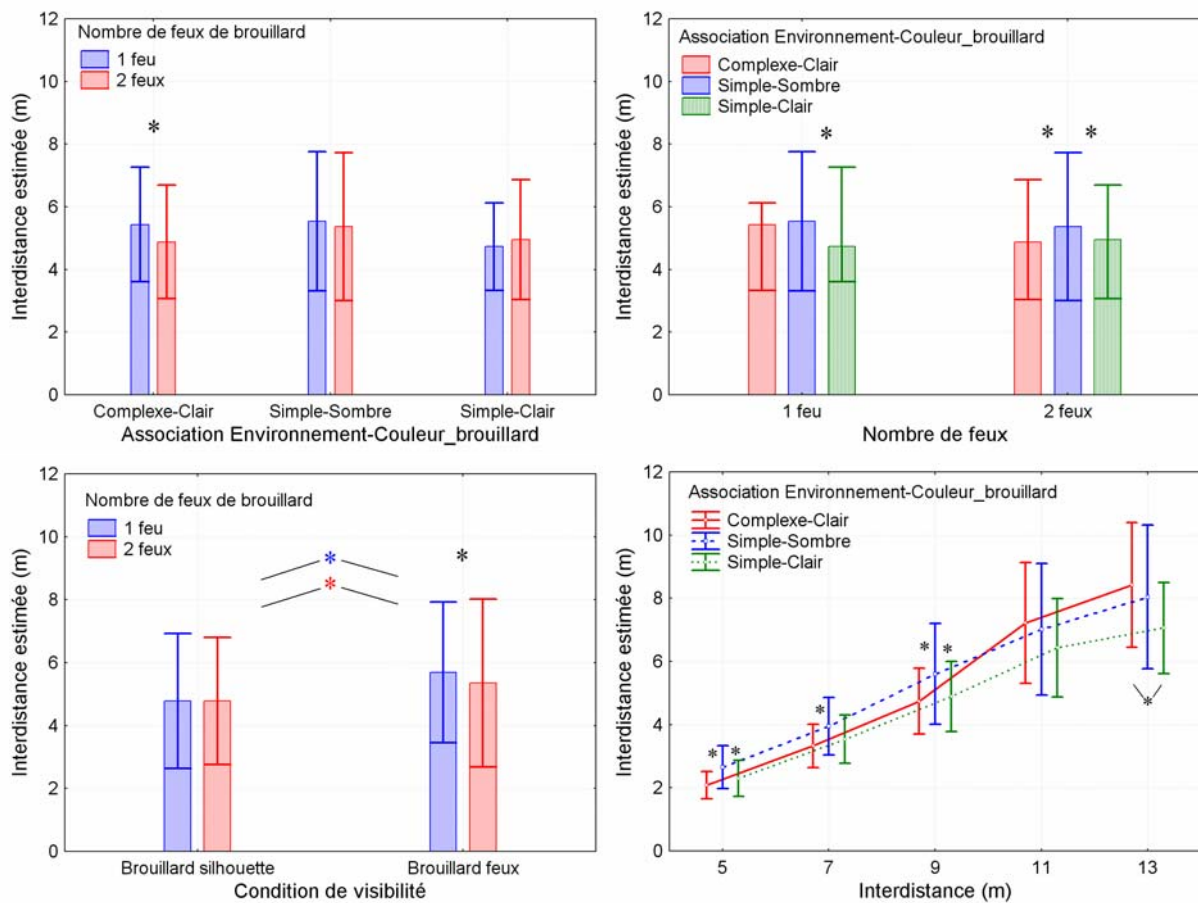


Figure 7 : Haut gauche et droite : Distance estimée en fonction du nombre de feux de brouillard et de l'association environnement-couleur_brouillard. Bas-gauche : Distance estimée en fonction de la condition de visibilité et du nombre de feux de brouillard. Bas-droite : Distance estimée en fonction de l'interdistance et de l'association environnement-couleur_brouillard. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

L'analyse montre également une interaction entre la condition de visibilité et le nombre de feux ($F(1,15)=6.02$; $p<.05$; $\eta^2=.286$) dans le sens d'une augmentation de la distance estimée lorsque le véhicule n'a qu'un feu en condition brouillard feux (Figure 7-bas-gauche). Les tests

post-hoc montrent ($p < .001$) que pour la condition brouillard feux les distances estimées sont plus importantes avec un seul feu de brouillard ($m = 5.7$; $\sigma = 4.04$) qu'avec deux feux ($m = 5.35$; $\sigma = 4.09$). De plus, les distances estimées sont plus grandes pour la condition brouillard feux que pour la condition brouillard silhouette pour les deux configurations de feux ($p < .005$).

Il y a d'autre part une interaction entre l'association environnement-couleur_brouillard et la distance ($F(8,120) = 4.55$; $p < .0001$; $\eta^2 = .233$) (Figure 7-bas-droite). Les tests post-hoc montrent que les distances estimées pour l'association simple-sombre sont plus grandes que celles de l'association complexe-clair de 5 à 9 m ($p < .01$) et plus grandes que celles de l'association simple-clair à 5 et 9 m ($p < .05$). De plus, les distances estimées pour l'association complexe-clair sont plus grandes que celles de l'association simple-clair à 13 m ($p < .025$).

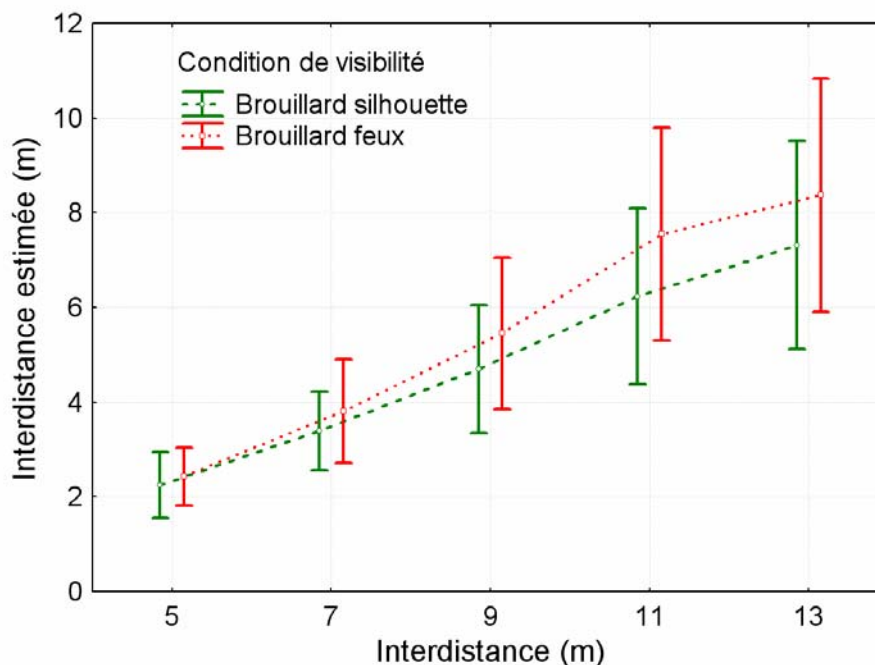


Figure 8 : Distance estimée en fonction de l'interdistance et de la condition de visibilité. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

Il n'y a pas d'interaction entre la condition de visibilité et l'interdistance (Figure 8). Il apparaît en revanche une interaction triple entre la condition de visibilité, l'interdistance, et l'association environnement-couleur_brouillard ($F(8,120) = 4.47$; $p < .001$; $\eta^2 = .23$) (Figure 9). Les tests post-hoc indiquent que la différence entre *brouillard silhouette* et *brouillard feux* est significative de 11 à 13 m pour l'association *complexe-clair* ($p < .005$), de 7 à 9 m pour l'association *simple-sombre* ($p < .05$) et de 5 à 11 m pour l'association *simple-clair* ($p < .01$). Ces différences vont dans le sens d'estimations plus grandes pour *brouillard feux* que pour *brouillard silhouette*. Les tests post-hoc révèlent également que pour la condition *brouillard*

silhouette, les distances estimées pour l'association *simple-sombre* sont plus importantes que celles estimées pour *simple-clair* à 5, 7, et 11 m ($p < .05$), et qu'elles sont également plus importantes que celles estimées pour *complexe-clair* à 5 m ($p < .0025$). Toujours pour la condition *brouillard silhouette*, les distances estimées pour *complexe-clair* sont plus importantes que celles estimées pour *simple-clair* à 11 m ($p < .05$). Pour la condition *brouillard feux* il n'apparaît pas de différences entre les associations *simple-sombre* et *simple-clair*, mais les distances estimées pour *complexe-clair* sont inférieures à celles estimées pour *simple-clair* à 5 et 7 m ($p < .001$) et à celles estimées pour *simple-sombre* à 5, 7 et 9 m ($p < .025$). En revanche elles sont supérieures à 13 m ($p < .005$).

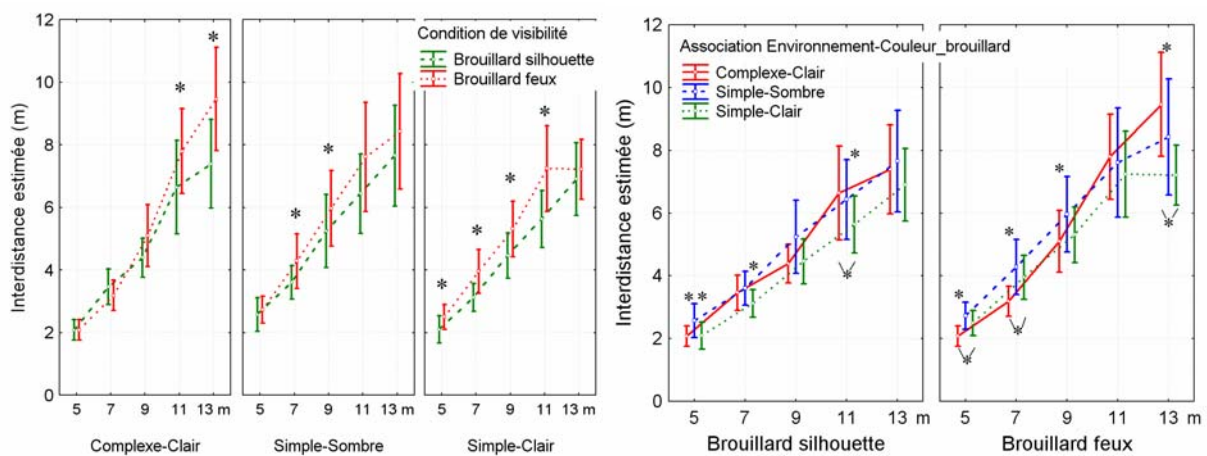


Figure 9 : Gauche et droite : Distance estimée en fonction de la condition de visibilité, de l'interdistance et de l'association environnement-couleur_brouillard. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls.

c. Effets d'ordre

Cette analyse fait apparaître une interaction entre l'ordre de passation *brouillard silhouette* / *brouillard feux* et la condition de visibilité ($F(1,14)=25.5$; $p < .00025$; $\eta^2=.646$) (Figure 10-gauche). Les tests post-hoc indiquent que les distances estimées pour les deux conditions de visibilité ne diffèrent significativement que pour les participants ayant eu l'ordre *brouillard feux* puis *brouillard silhouette*, dans le sens d'estimations plus grandes pour la condition *brouillard feux* ($m=5.67$; $\sigma=4.37$) que pour *brouillard silhouette* ($m=4.05$; $\sigma=2.58$) ($p < .00025$). L'analyse met également en évidence une interaction triple entre l'ordre de passation *brouillard silhouette* / *brouillard feux*, le nombre de feux, et l'interdistance ($F(4,56)=2.56$; $p < .05$; $\eta^2=.155$) (Figure 10-droite). Les tests post-hoc font apparaître une différence à 13 m entre les deux configurations de feux pour les participants ayant eu l'ordre *brouillard feux* puis *brouillard silhouette* ($p < .05$). Enfin, l'analyse fait apparaître une

interaction quadruple entre l'ordre de passation *brouillard silhouette* / *brouillard feux*, l'association environnement-couleur_brouillard, le nombre de feux, et la distance ($F(8,112)=2.72$; $p<.01$; $\eta^2=.163$). Nous ne détaillerons pas cette interaction à cause du grand nombre de variables impliquées. On notera qu'il n'y a aucun effet de l'ordre visibilité normale / visibilité réduite.

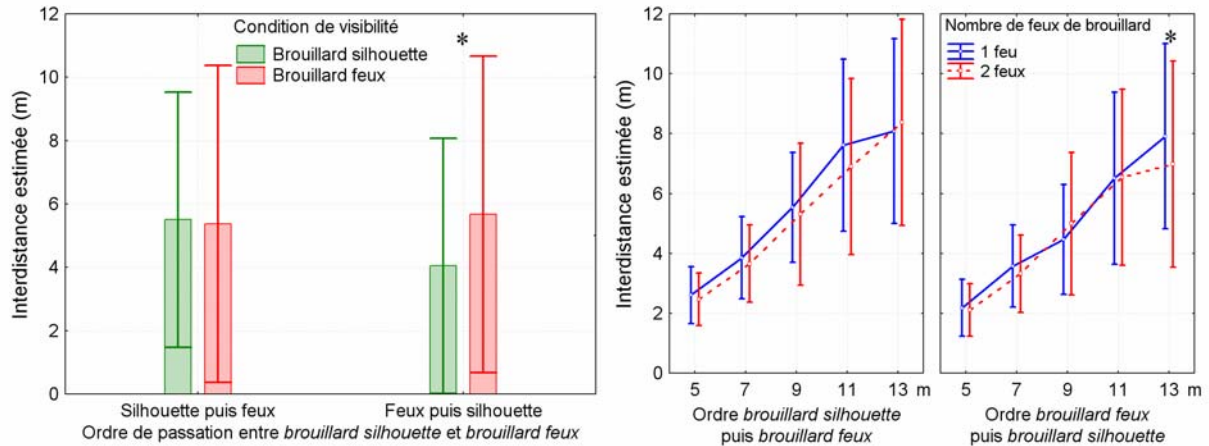


Figure 10 : Gauche : Distance estimée en fonction de la condition de visibilité et de l'ordre de passation entre brouillard silhouette et brouillard feux. Droite : Distance estimée en fonction de l'interdistance, du nombre de feux de brouillard, et de l'ordre de passation entre brouillard silhouette et brouillard feux. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

8.2.2 Analyse incluant les trois conditions de visibilité

En condition de visibilité réduite, nous considérons la configuration avec deux feux de brouillard comme situation de référence. En donnant accès à l'information de taille familière, la présence de deux feux de brouillard rend cette condition plus facilement comparable avec la condition de visibilité normale que lorsqu'il n'y a qu'un feu de brouillard. Dès lors, cette seconde analyse porte sur l'ensemble des essais réalisés en condition de visibilité normale ou en condition de visibilité réduite avec deux feux de brouillard. Il s'agit d'une analyse de variance à mesures répétées $3 \times 5 \times 3$ (Condition de visibilité x Interdistance x Association environnement-couleur_brouillard).

a. Effets principaux

Cette analyse met en évidence un effet principal de la condition de visibilité ($F(2,30)=6.24$; $p<.01$; $\eta^2=.294$) allant dans le sens d'estimations plus grandes lorsque la visibilité est réduite (Figure 11-gauche). Les tests post-hoc montrent ($p<.05$) que les estimations sont plus petites pour la condition de visibilité normale ($m=4.13$; $\sigma=2.79$) que pour les deux conditions

de visibilité réduite ($m=4.78$; $\sigma=3.41$ pour *brouillard silhouette*, et $m=5.35$; $\sigma=4.09$ pour *brouillard feux*). Il y a également un effet principal de l'interdistance ($F(4,60)=115.3$; $p<.0001$; $\eta^2=.885$) dans le sens d'estimations plus grandes pour les grandes interdistances (Figure 11-droite). Les tests post-hoc montrent que toutes les conditions diffèrent significativement ($p<.05$). Les estimations sont respectivement de 2.21, 3.39, 4.87, 6.32, et 7.38 m avec des écarts type de respectivement 1.13, 1.68, 2.92, 3.78, et 4.42 pour les interdistances de 5, 7, 9, 11, et 13 m.

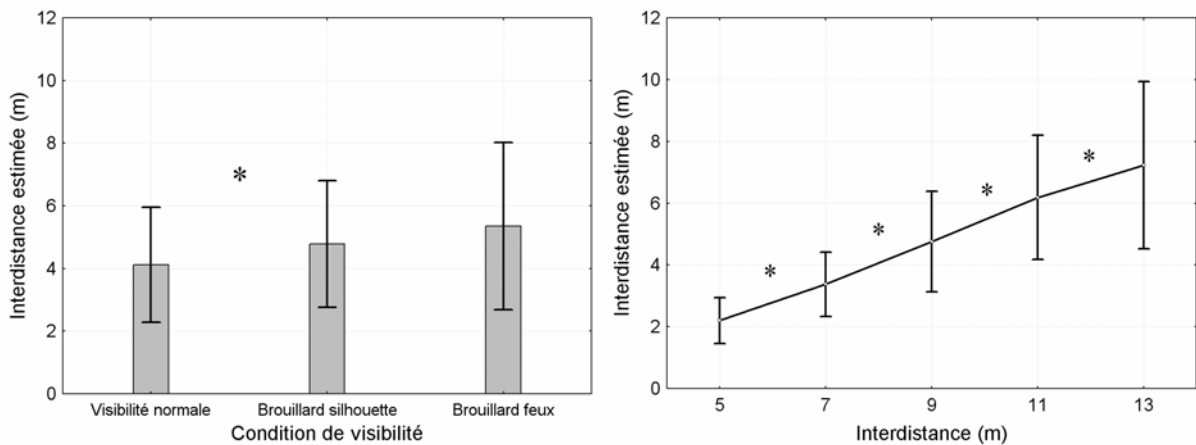


Figure 11 : Gauche : Distance estimée en fonction de la condition de visibilité. Droite : Distance estimée en fonction de l'interdistance. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

b. Interaction

Il y a une interaction entre l'interdistance et l'association environnement-couleur_brouillard ($F(8,120)=3.73$; $p<.001$; $\eta^2=.199$) (Figure 12). Les tests post-hoc montrent que les distances estimées pour l'association *complexe-clair* sont plus courtes que celles des associations *simple-sombre* et *simple-clair* à 5 et 7 m ($p<.05$). De plus, les distances estimées pour l'association *simple-sombre* sont plus grandes que celles de l'association *simple-clair* à 7 m ($p<.01$). Notons que l'analyse de variance (ayant le logarithme de l'interdistance estimée comme variable dépendante) ne fait pas apparaître d'interaction entre la condition de visibilité et l'interdistance (Figure 13).

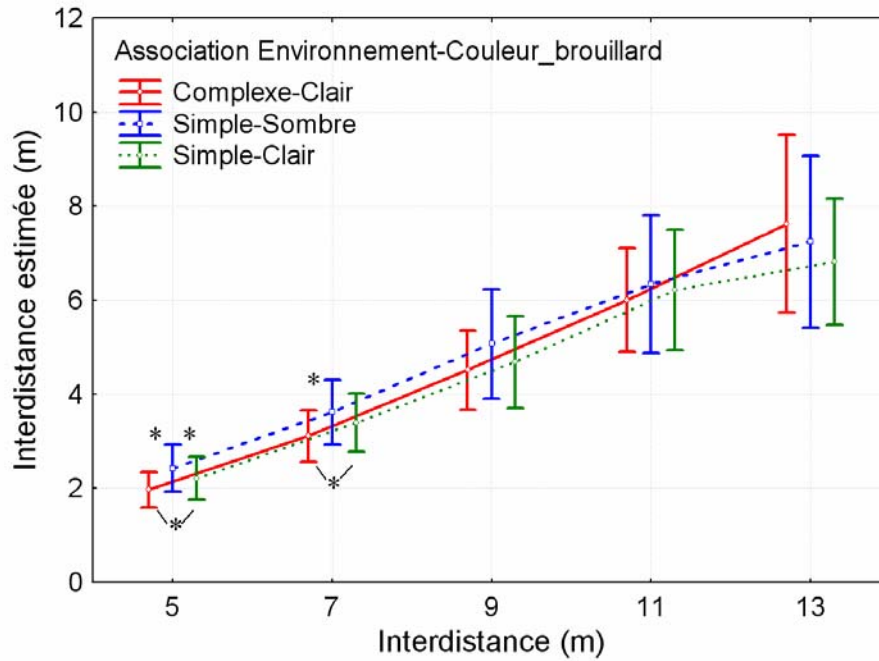


Figure 12 : Distance estimée en fonction de l'interdistance et de l'association environnement-couleur_brouillard. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls.

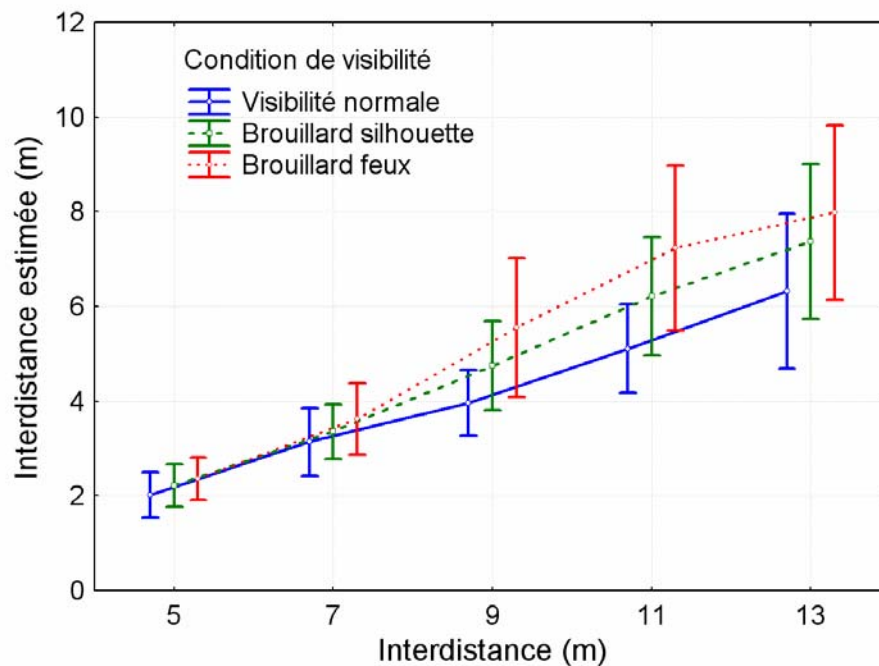


Figure 13 : Distance estimée en fonction de l'interdistance et de la condition de visibilité. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

c. Effet d'ordre

Cette analyse fait apparaître une interaction entre l'ordre de passation *brouillard silhouette* / *brouillard feux* et la condition de visibilité ($F(2,28)=11.6$; $p < .00025$; $\eta^2=.453$). Cette

interaction va dans le sens d'estimations d'autant plus grandes que la visibilité est réduite, uniquement pour les participants ayant eu l'ordre *brouillard feux* puis *brouillard silhouette* (Figure 14). Les tests post-hoc montrent que pour ces participants, les distances estimées sont plus grandes pour la condition *brouillard feux* ($m=3.12$; $\sigma=1.74$) que pour les deux autres conditions ($p<.005$), et qu'elles sont plus grandes pour la condition *brouillard silhouette* ($m=4.09$; $\sigma=2.53$) que pour la condition de visibilité normale ($m=5.49$; $\sigma=4.4$) ($p<.0025$). On notera qu'il n'y a aucun effet de l'ordre visibilité normale / visibilité réduite.

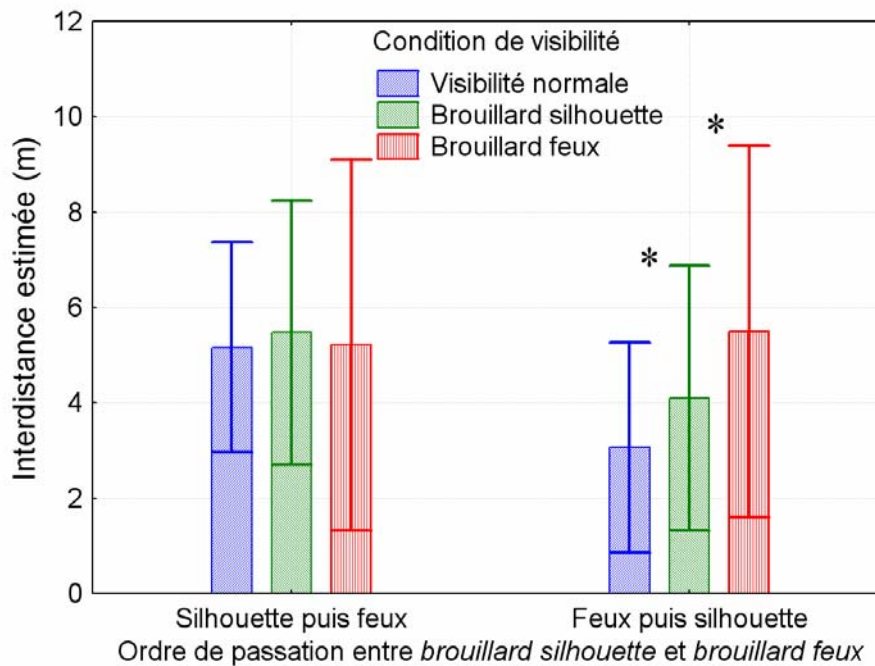


Figure 14 : Distance estimée en fonction de la condition de visibilité et de l'ordre de passation entre brouillard silhouette et brouillard feux. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

8.2.3 Analyse portant sur les essais en condition de visibilité normale

Une troisième analyse a été réalisée, portant uniquement sur la condition de visibilité normale. Il s'agit d'une analyse de variance à mesures répétées 2 x 9 (Environnement x Interdistance). La couleur du brouillard n'étant pas étudiée en condition de visibilité normale, il n'y a que deux environnements à comparer : complexe et simple. D'autre part, nous avons pris en compte les neuf interdistances présentées en condition de visibilité normale dans le but d'avoir une vision plus globale.

Cette analyse montre d'une part un effet de l'interdistance ($F(8,120)=122.7$; $p<.0001$; $\eta^2=.891$) dans le sens d'estimations plus grandes pour les grandes interdistances. Les tests

post-hoc montrent que toutes les distances diffèrent significativement, sauf 11 et 13 m. L'analyse fait également apparaître une interaction entre l'environnement et l'interdistance ($F(8,120)=2.23$; $p<.05$; $\eta^2=.129$) (Figure 15). Les tests post-hoc montrent que les estimations pour l'environnement *complexe* sont inférieures à celles de l'environnement *simple* à 5 m ($p<.025$), et qu'elles leurs sont supérieures à 13 m et à 61 m ($p<.025$). Les moyennes et écarts type pour l'environnement complexe et l'environnement simple sont respectivement : $m=1.81$; $\sigma=0.98$ et $m=2.13$; $\sigma=1.2$ à 5 m, $m=6.86$; $\sigma=3.45$ et $m=6.06$; $\sigma=4.25$ à 13 m, et $m=35.5$; $\sigma=28.1$ et $m=26.6$; $\sigma=14.5$ à 61 m.

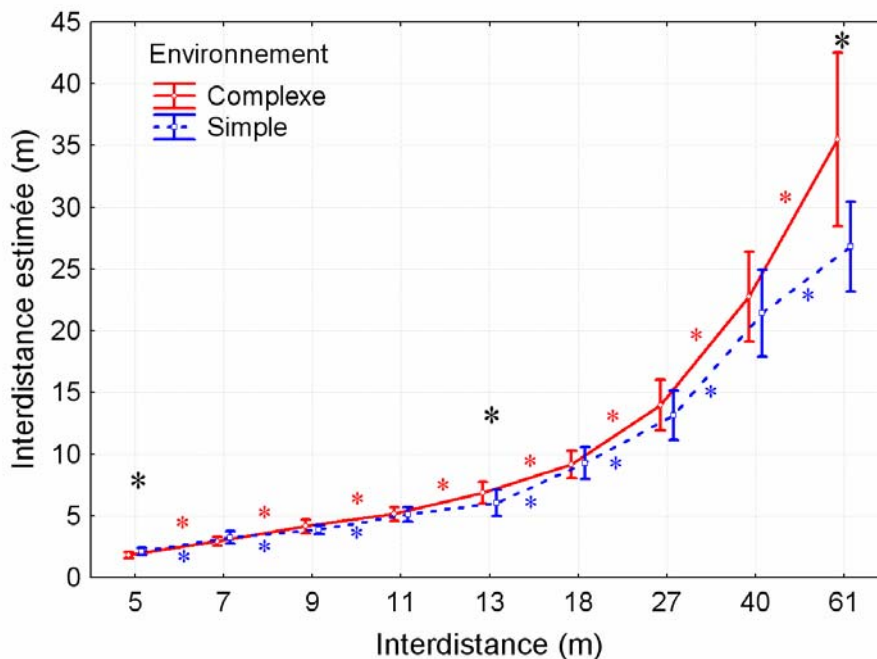


Figure 15 : Distance estimée en condition de visibilité normale en fonction de l'environnement et de l'interdistance. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

8.2.4 Ampleur de la surestimation

Pour mieux évaluer l'ampleur des différences observées, nous avons calculé le taux de surestimation des interdistances en condition de brouillard par rapport à la condition de visibilité normale (en donnant le même poids aux différents participants et aux différentes distances simulées). Nous observons pour l'ensemble des participants une surestimation de respectivement 24% et 49.1% pour les conditions *brouillard silhouette* et *brouillard feu*. Si l'on ne considère que les participants ayant eu l'ordre *brouillard feu* puis *brouillard silhouette*, le taux de surestimation est de respectivement 34.8% et 88.2% pour les conditions *brouillard silhouette* et *brouillard feu*. Nous avons également distingué les deux

configurations de feux pour la condition *brouillard feux*. En considérant l'ensemble des participants, nous observons une surestimation de 43.1% lorsqu'il y a deux feux de brouillard et de 55.1% lorsqu'il n'y en a qu'un.

8.3 Discussion concernant l'expérience 1

8.3.1 Influence du brouillard sur les distances estimées

a. Effet de la condition de visibilité

Les analyses montrent un effet de la condition de visibilité dans le sens où les estimations de l'interdistance sont plus grandes en condition de visibilité réduite qu'en condition de visibilité normale (Figure 6-haut et Figure 11-gauche). Cette surestimation va dans le sens des résultats obtenus en salle de brouillard (Cavallo et al., 2001) et des résultats obtenus sur simulateur de conduite par Cavallo et al. (2002). L'amplitude de la surestimation diffère néanmoins de celle observée par ces études. Nous observons une surestimation de seulement 49.1% en condition *brouillard feux* alors qu'elle était plus importante pour Cavallo et al. (2002). Au contraire, nous observons une surestimation de 24% en condition *brouillard silhouette* alors que Cavallo et al. (2002) n'observaient pas de surestimation pour cette condition. L'explication de cette différence de résultats réside probablement dans l'effet d'ordre que nous avons observé.

b. Effet d'ordre

L'effet de l'ordre *brouillard silhouette / brouillard feux* implique par son caractère séquentiel une notion de mémoire (Figure 10-gauche et Figure 14). Il s'agirait d'un phénomène de contamination. L'explication que nous proposons porte sur une stratégie séquentielle interne aux blocs qui pourrait être adoptée par les participants. Le questionnaire post-expérimental révèle que les participants ont cherché à maintenir une cohérence sur l'ensemble de leurs réponses. Cette recherche de cohérence implique une comparaison directe ou indirecte entre l'essai courant et les essais antérieurs. Certains participants le révèlent effectivement. En condition *brouillard feux*, les participants ne peuvent utiliser que la taille des halos, la hauteur et éventuellement l'écartement des feux pour déterminer la distance du véhicule cible, et doivent donc adopter une stratégie basée uniquement sur ces quelques informations. Il est alors possible que même si la séquence se poursuit par des images contenant de nouvelles informations (condition *brouillard silhouette*), les participants aient

tendance à maintenir la stratégie adoptée par souci de comparaison et de cohérence avec les essais qui précédent. De même en condition *brouillard silhouette* un certain nombre d'informations sont disponibles. On peut notamment citer l'information de taille familière fournie directement par la silhouette du véhicule cible. Les participants ont alors la possibilité de mémoriser la position des feux par rapport à la silhouette du véhicule, ce qui peut leur permettre en condition *brouillard feux* d'utiliser les informations de taille familière et de hauteur dans le champ visuel de façon plus précise. L'utilisation de ces informations pourrait alors suffire à exclure l'information de perspective aérienne qui est erronée et à rétablir des estimations correctes de l'interdistance.

Il faut noter que cette hypothèse ne peut être valide que si en dehors de tout phénomène séquentiel il n'y a que peu ou pas de surestimation des distances pour la condition *brouillard silhouette*. En effet, aucune différence n'est apparue entre la condition de visibilité normale et la condition *brouillard silhouette* lorsque celle-ci était placée en début de bloc. Dans ce cas, la différence apparaissant entre ces deux conditions lorsque les blocs commencent par la condition *brouillard feux* serait attribuable au phénomène séquentiel décrit ci-dessus, et non à un phénomène perceptif proprement dit. D'après cette interprétation, il n'y aurait pas de surestimation de l'interdistance en condition *brouillard silhouette*, et la surestimation serait de 88.2% pour la condition *brouillard feux* (correspondant au taux de surestimation pour les participants ayant eu l'ordre *brouillard feux* puis *brouillard silhouette*). Ces valeurs sont plus cohérentes avec celles observées par Cavallo et al. (2002), ce qui soutient notre interprétation concernant l'effet d'ordre.

Nous venons de voir que la distance estimée pour un essai donné est influencée par les essais antérieurs. Il est donc envisageable que la présence d'interdistances plus longues en condition de visibilité normale qu'en condition de visibilité réduite amène les participants à surestimer les interdistances en condition de visibilité réduite. Une telle influence de la condition de visibilité normale sur les conditions de visibilité réduite serait due à des processus cognitifs plutôt que perceptifs. De plus, elle se traduirait par un effet de l'ordre *visibilité normale / visibilité réduite* et/ou par une interaction entre l'ordre et la condition de visibilité. Puisque aucun effet de l'ordre *visibilité normale / visibilité réduite* n'est apparu, on peut considérer que la surestimation observée en condition de visibilité réduite n'est pas due à une influence mutuelle entre la condition de visibilité normale et les conditions de visibilité réduite. Par ailleurs, la présence d'une pause entre les blocs successifs serait suffisante pour

éviter l'effet de contamination qui a été observé de façon interne aux blocs. Les participants devraient donc reconstruire une stratégie et de nouvelles correspondances entre les images et les distances au début de chaque bloc.

c. Nombre de feux de brouillard

Concernant le nombre de feux de brouillard, nous observons un effet allant dans le sens de distances estimées plus grandes lorsqu'il n'y a qu'un feu de brouillard que lorsqu'il y en a deux (Figure 19-bas-droite), mais uniquement pour l'association *complexe-clair* (Figure 20-haut-gauche). Ce résultat est conforme aux résultats de Cavallo et al. (2002) qui utilisaient également l'association *complexe-clair*. Comme nous le verrons plus loin, la position des feux de brouillard à l'arrière du véhicule est susceptible d'expliquer l'absence d'effet pour les associations *simple-sombre* et *simple-clair*. On constate également que le nombre de feux de brouillard a une influence pour la condition *brouillard feux* mais n'en a pas pour la condition *brouillard silhouette* (Figure 20-bas-gauche). La présence d'un second feu donne accès à l'information de taille familière, ce qui rend l'estimation plus précise pour la condition *brouillard feux*. En revanche, la silhouette du véhicule fournit déjà une telle information en condition *brouillard silhouette*. Le second feu de brouillard n'apporte donc aucune information supplémentaire pour cette condition.

8.3.2 Explication des résultats contradictoires ?

L'objectif principal de cette expérience est de savoir si les paramètres manipulés (complexité de l'environnement, couleur du brouillard, couleur du véhicule cible, nombre de feux de brouillard) peuvent expliquer les résultats contradictoires de Cavallo et al. (2002) et de Beaudoin (2002). Pour répondre à cette question, nous pouvons comparer les estimations d'interdistance faites pour les trois associations environnement-couleur_brouillard. Comme nous l'avons vu, l'association *complexe-clair* correspond à l'expérience de Cavallo et al. (2002) et l'association *simple-sombre* correspond à l'expérience de Beaudoin (2002).

La complexité de l'environnement a été manipulée entre les associations *complexe-clair* et *simple-clair*. Si la complexité de l'environnement a une influence sur les estimations de l'interdistance, ce devrait être en particulier pour la condition de visibilité normale. L'analyse portant uniquement sur la condition de visibilité normale fait effectivement apparaître une interaction entre l'environnement et l'interdistance (Figure 15). On constate cependant que cette interaction va dans le sens opposé à ce qui aurait pu expliquer les résultats

contradictoires de Cavallo et al. (2002) et Beaudoin (2002). Comme le laissaient penser les travaux de Teghtsoonian et Teghtsoonian (1969, 1970), après ajustement des données à une loi de Stevens, l'exposant est plus grand pour l'environnement complexe que pour l'environnement simple. Les fonctions ajustées sont : $d = 0.36 \cdot D^{1.12}$ pour l'environnement complexe, et $d = 0.59 \cdot D^{0.94}$ pour l'environnement simple, où d et D représentent respectivement la distance estimée et la distance simulée.

Pour la condition *brouillard silhouette*, il apparaît des estimations plus grandes pour l'association *complexe-clair* que pour *simple-clair*, mais uniquement à 11 m. La couleur du véhicule cible n'a donc pas d'influence notable sur les estimations. Des différences apparaissent également pour la condition *brouillard feux*, mais nous verrons qu'elles sont probablement liées au positionnement des feux de brouillard à l'arrière des véhicules plutôt qu'à la complexité de l'environnement qui n'est pas visible pour cette condition. Quelle que soit la cause des différences observées entre les associations *complexe-clair* et *simple-clair*, une surestimation des interdistances en condition de visibilité réduite apparaît pour les deux associations.

La couleur du brouillard est le seul facteur manipulé entre les associations *simple-sombre* et *simple-clair*. Pour la condition *brouillard silhouette*, les estimations sont généralement plus courtes pour la condition *simple-clair* que pour la condition *simple-sombre*. Le véhicule cible étant plus sombre que le brouillard, son contraste par rapport au fond est le même pour les deux couleurs de brouillard. On suppose que cet argument tient également pour le véhicule associé à l'environnement complexe puisqu'il comporte de larges zones de couleur sombre. Les estimations différentes ne peuvent donc pas être expliquées par une différence de contraste. On suppose par ailleurs que cette différence ne peut pas être due aux feux de brouillard puisqu'elle n'apparaît pas pour la condition *brouillard feux*. L'explication la plus plausible repose alors sur la luminance moyenne qui est plus élevée dans le cas du brouillard clair. Cette interprétation est cohérente avec les travaux de Cavallo et al. (2000) qui observent une surestimation bien plus importante en condition nocturne qu'en condition diurne. Il est donc possible que l'influence de la luminance du brouillard sur l'estimation de l'interdistance se retrouve en situation réelle. On constate par ailleurs que les différences observées vont dans le sens opposé à ce qui aurait pu expliquer les résultats contradictoires de Cavallo et al. (2002) et Beaudoin (2002). La couleur du brouillard ne remet donc pas en cause la surestimation des interdistances en condition de visibilité réduite observée par Cavallo et al. (2002).

Nous souhaitons enfin savoir si le nombre de feux de brouillard était en cause. Les résultats montrent que les distances sont surestimées en condition de brouillard, même lorsque le véhicule cible possède deux feux de brouillard (Figure 11-gauche). De plus, nous avons vu que le nombre de feux de brouillard n'influence pas systématiquement les estimations de l'interdistance (Figure 7-haut-gauche). Le nombre de feux de brouillard ne serait donc pas en cause dans les résultats contradictoires de Cavallo et al. (2002) et Beaudoin (2002).

Les résultats contradictoires obtenus par Cavallo et al. (2002) et Beaudoin (2002) ne sont expliqués par aucun des trois facteurs dont l'influence a été discutée ci-dessus. Dans la mesure où les résultats de cette expérience montrent une surestimation des interdistances indépendamment de ces facteurs, ils renforcent le caractère reproductible des résultats précédemment obtenus en salle de brouillard (Cavallo et al., 2001) et sur simulateur (Cavallo et al., 2002). Les résultats de cette expérience confirment en effet que l'interdistance est surestimée en condition de visibilité réduite, mais pas lorsque la silhouette du véhicule cible et la chaussée sont visibles.

8.3.3 *Position des feux de brouillard*

La première analyse de variance réalisée met en évidence une interaction entre la condition de visibilité, l'interdistance, et l'association environnement-couleur_brouillard (Figure 9-droite). Pour les interdistances courtes de la condition *brouillard feux*, les estimations sont plus courtes pour l'association complexe-clair que pour les deux autres associations. Au contraire pour la plus grande interdistance, les estimations sont plus grandes pour l'association complexe-clair. Ces différences sont observées pour la condition *brouillard feux*, où seuls les feux de brouillard sont visibles (excepté quelques mètres de chaussée pour la plus grande interdistance). Les différences observées doivent donc être attribuées aux feux de brouillard. La principale différence concernant les feux est leur position à l'arrière des véhicules. En effet, le véhicule associé à l'environnement complexe a ses feux de brouillard plus hauts et plus éloignés l'un de l'autre que le véhicule associé à l'environnement simple.

Les résultats de Cavallo et al. (2001) ainsi que ceux de Buchner et al. (2006) montrent que dans le cas où la silhouette n'est pas visible, les distances estimées sont plus courtes lorsque les feux de brouillard sont plus éloignés l'un de l'autre. Ce phénomène repose sur l'utilisation de l'information de taille familière. On constate effectivement que les distances estimées sont plus courtes de 5 à 9 m pour le véhicule de l'environnement complexe qui a les feux plus

éloignés. Par ailleurs, la hauteur des feux modifie l'information de hauteur dans le champ visuel. Bien que Cavallo et al. (2001) ne l'aient pas observé, Buchner et al. (2006) montrent que la hauteur des feux influence l'interdistance estimée dans le sens d'estimations plus grandes lorsque les feux sont plus hauts. Ce phénomène pourrait donc expliquer les estimations plus grandes dans l'environnement complexe pour l'interdistance de 13 m.

On peut néanmoins se demander pourquoi la hauteur des feux n'influencerait les estimations que pour la plus grande interdistance. Du point de vue géométrique (Figure 16), la modification de l'information de hauteur dans le champ visuel (en termes de distance perçue) due à la hauteur des feux est proportionnelle à la distance du véhicule. Ainsi, plus l'interdistance est grande, plus une augmentation donnée de la hauteur des feux devrait conduire à une grande augmentation de l'interdistance perçue. Le positionnement plus haut des feux pour l'environnement complexe pourrait donc compenser l'effet du plus grand écartement lorsque l'interdistance est grande, voire inverser la tendance. C'est effectivement ce que l'on constate (Figure 9-droite).

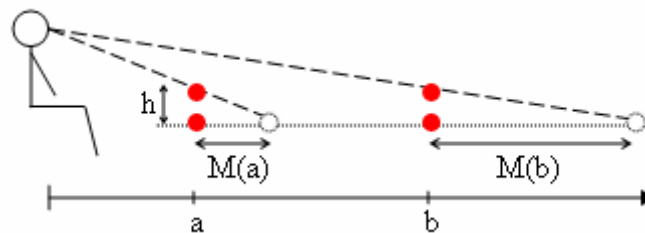


Figure 16 : Du point de vue géométrique, la modification de l'information de hauteur dans le champ visuel due à la hauteur des feux est proportionnelle à leur distance. Les quatre points rouges représentent un feu de brouillard à deux hauteurs différentes et à deux distances a et b de l'observateur. $M(a)$ et $M(b)$ représentent la modification de l'information de hauteur dans le champ visuel (en termes de distance perçue) due à la modification de la hauteur h du feu pour les distances a et b .

Par ailleurs, l'information de hauteur dans le champ visuel est l'une des seules informations disponibles lorsqu'il n'y a qu'un feu en condition *brouillard feux*. On peut donc s'attendre à ce que l'influence de la hauteur des feux soit plus grande lorsqu'il n'y a qu'un feu de brouillard que lorsqu'il n'y en a deux, puisqu'il n'y a pas d'informations fiables disponibles. Bien qu'il n'y ait pas d'interaction quadruple, la Figure 17 présente la distance estimée pour la condition *brouillard feux* en fonction des trois autres variables. On constate que pour l'association *complexe-clair*, les estimations sont effectivement plus grandes entre 11 et 13 m lorsqu'il n'y a qu'un feu de brouillard que lorsqu'il y en a deux. Cette observation va dans le sens de l'hypothèse qui vient d'être exposée. Pourtant, Buchner et al. (2006) observent la

même influence de la hauteur des feux qu'il y en ait un ou deux. Cette absence de différence est probablement due à l'utilisation d'un brouillard moins dense qui donne accès à d'autres informations de distance, tels que les gradients de texture de la chaussée. L'accès à ces informations supplémentaires limite l'influence de l'information de taille familière qui est disponible en présence d'un second feu.

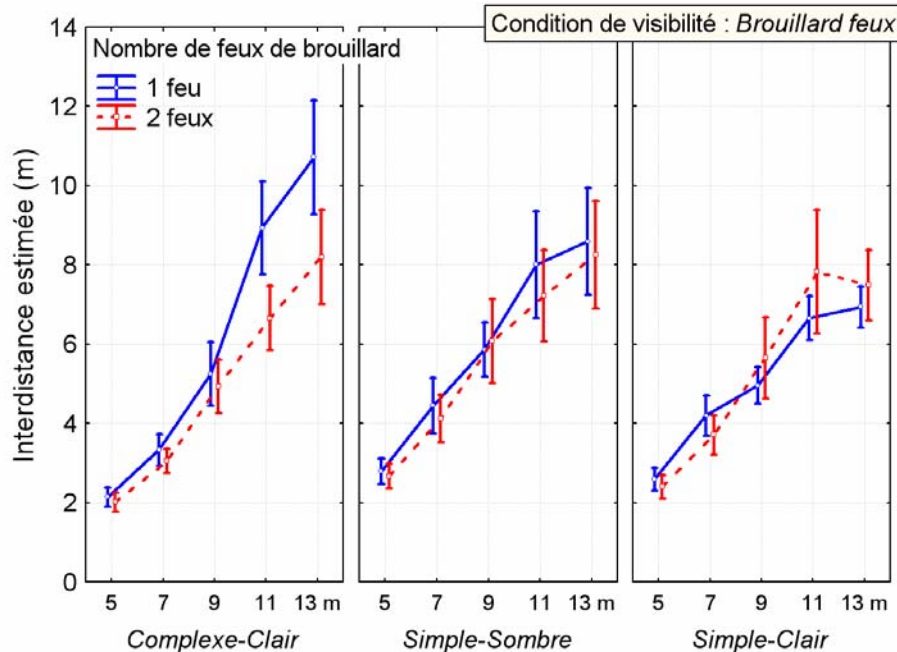


Figure 17 : Distance estimée pour la condition brouillard-feux, en fonction de l'interdistance, de l'association environnement-couleur_brouillard, et du nombre de feux. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

D'après l'hypothèse exposée ci-dessus, la position haute des feux de brouillard pour le véhicule de l'environnement complexe pourrait expliquer l'effet observé du nombre de feux de brouillard pour l'association *complexe-clair*, alors qu'il n'a pas eu d'effet pour les associations *simple-sombre* et *simple-clair* (Figure 7-haut-gauche). Plusieurs expériences réalisées en salle de brouillard ou sur simulateur avaient précédemment montré une surestimation plus importante de l'interdistance lorsque le véhicule ne comportait qu'un feu de brouillard que lorsqu'il en comportait deux (Cavallo et al., 2001, 2002). Pour ces expériences, le brouillard était très dense, et masquait la silhouette du véhicule et la chaussée. D'après ce que nous venons de voir, il est possible que cet effet soit lié à la hauteur des feux à l'arrière des véhicules. L'effet du nombre de feux se serait alors atténué avec des feux plus bas mais serait de plus grande ampleur avec des feux plus hauts.

9 Expérience 2

Nous venons de voir à travers une première expérience que la différence de résultats des expériences de Cavallo et al. (2002) et de Beaudoin (2002) n'est expliquée par aucun des paramètres manipulés. Ces paramètres étaient la complexité de l'environnement, le nombre de feux de brouillard, la couleur du véhicule cible, et la couleur du brouillard. Trois autres différences méthodologiques entre les expériences de Cavallo et al. (2002) et Beaudoin (2002) n'ont pas été étudiées lors de cette première expérience. Il s'agit de la densité du brouillard, de la gamme des interdistances étudiées, et du caractère statique ou dynamique de la simulation. Cette seconde expérience avait été réalisée antérieurement à la première expérience présentée, mais apporte néanmoins des éléments de réponse concernant ces trois différences méthodologiques.

9.1 Méthode

L'expérience a été réalisée avec un second groupe de participants comprenant quatre hommes et quatre femmes, ayant entre 25 et 35 ans. La méthode est la même que pour l'expérience 1, excepté pour les conditions expérimentales et la procédure, décrits ci-dessous. Le matériel diffère également par le système d'affichage qui était composé de trois écrans au lieu d'un seul, permettant un angle de vision total de 150° dans le sens horizontal.

9.1.1 *Conditions expérimentales*

Nous avons utilisé quatre variables indépendantes qui étaient la condition de visibilité, l'interdistance avec le véhicule cible, le type de véhicule cible, et l'environnement.

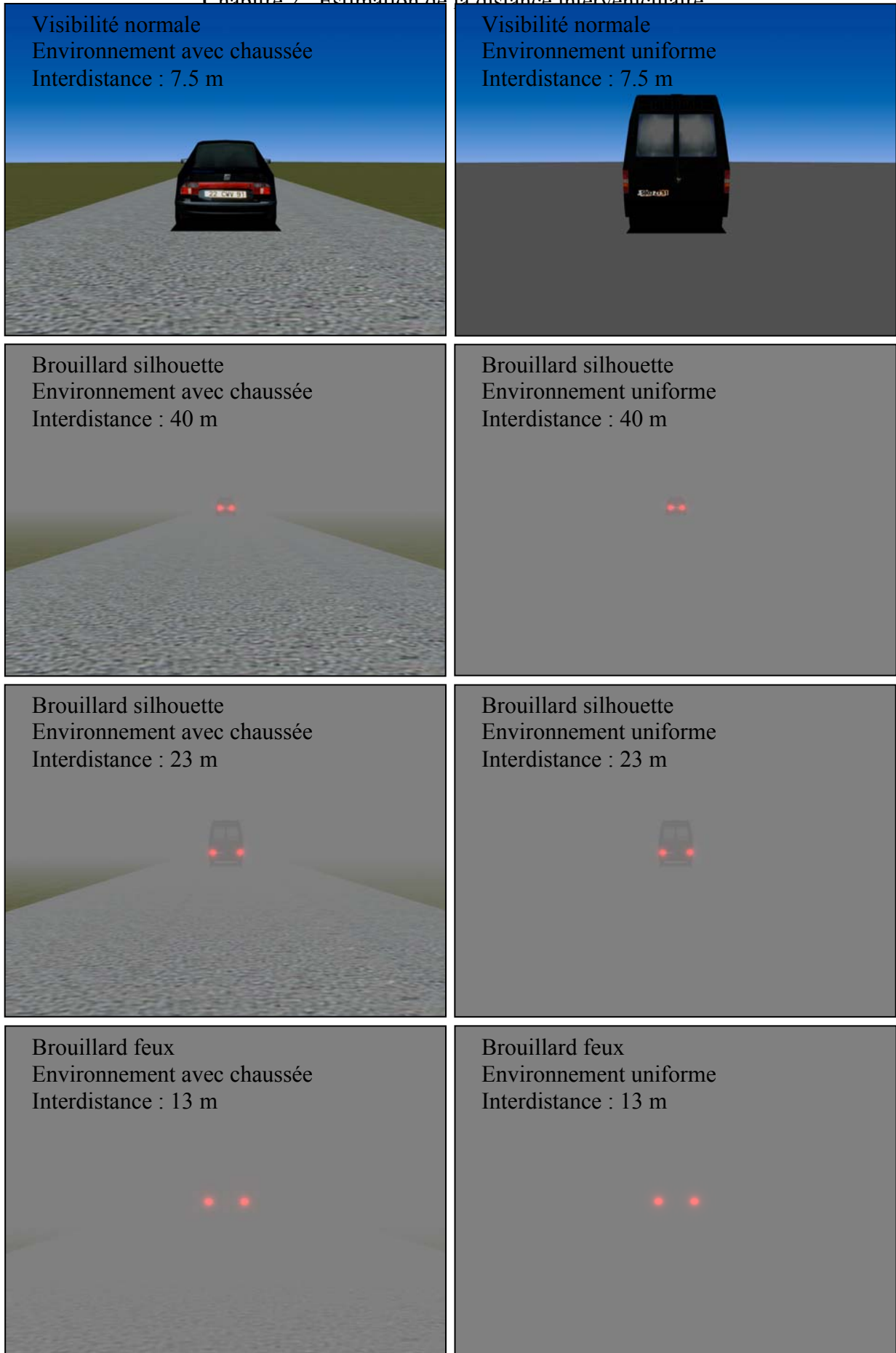


Figure 18 : Captures de l'écran du simulateur. La condition de visibilité, le type d'environnement et l'interdistance sont indiqués sur chaque image.

Chapitre 2 : Estimation de la distance intervéhiculaire

La condition de visibilité était composée des trois mêmes modalités que précédemment : *visibilité normale*, *brouillard silhouette*, et *brouillard feux*. Pour les trois conditions de visibilité, les interdistances utilisées étaient : 7.5, 13, 23, 40, et 70 m. Le Tableau 3 présente la densité du brouillard utilisée pour les différentes conditions expérimentales. Deux environnements différents ont été utilisés. L'un nommé *environnement avec chaussée* correspondait à l'environnement simple utilisé pour l'expérience 1. Il était ainsi composé d'une chaussée texturée de 7 m de large et d'une texture verte simulant l'herbe sur les côtés (Figure 18). L'autre, nommé *environnement uniforme* se composait uniquement d'une surface grise uniforme. Enfin, le véhicule cible pouvait être un véhicule léger ou un fourgon, tous les deux de couleur noire. Les deux véhicules comportaient deux feux de brouillard espacés de 0.92 m pour le véhicule léger et de 1.24 m pour le fourgon. La hauteur des feux était la même pour les deux véhicules. Par ailleurs, la couleur de brouillard utilisé pour cette expérience correspond au brouillard sombre de l'expérience 1.

| Distance Œil – pare-choc (m) | Distance de Visibilité Météorologique (m) | |
|---------------------------------|---|-----------------|
| | Brouillard silhouette | Brouillard feux |
| 7.5 | 9 | 4 |
| 13 | 16 | 7 |
| 23 | 28 | 12 |
| 40 | 48 | 21 |
| 70 | 84 | 37 |

Tableau 3 : Densités de brouillard (sous la forme de la Distance de Visibilité Météorologique) utilisées pour chaque distance intervéhiculaire (distance œil à pare-choc), en fonction de la condition de visibilité.

9.1.2 Procédure

Contrairement à l'expérience 1, la présente expérience comportait une première partie visant à familiariser les participants avec les distances métriques. Cette partie réalisée en espace extérieur se composait de 28 estimations de distances égocentrées, comprises entre 7 et 90 m. Un feedback était donné après chaque essai afin de permettre aux participants d'améliorer leurs estimations.

La seconde partie de l'expérience était réalisée dans le simulateur de conduite comme pour l'expérience 1. Les participants n'avaient alors plus de feedback sur l'exactitude de leurs

réponses. Cette partie était composée de 120 essais, correspondant à la combinaison de trois conditions de visibilité, de cinq interdistances, de deux véhicules cibles, et de deux environnements, chaque condition expérimentale étant présentée deux fois. Chaque combinaison des trois conditions de visibilité et des deux environnements était présentée par bloc, dans un ordre contrebalancé. Le contrebalancement des six blocs se faisait d'abord selon que la condition de visibilité soit normale ou réduite. Les deux conditions de visibilité réduite étaient ensuite contrebalancées selon qu'il s'agisse de *brouillard silhouette* ou de *brouillard feux*. Le contrebalancement se faisait enfin en fonction de l'environnement. L'ordre de passation des différents blocs par les participants est présenté en Annexe 2 (page 264). Chaque bloc était composé de 20 essais correspondant à la combinaison des cinq interdistances et des deux véhicules cibles, où chaque condition était présentée deux fois. Les essais des différents blocs étaient présentés dans un ordre aléatoire différent pour chaque bloc et pour chaque participant. La position latérale des véhicules sur la chaussée (le véhicule cible ainsi que le point de vue de l'observateur) changeait d'un essai à l'autre afin de faire varier la position visuelle du véhicule cible.

9.2 Résultats de l'expérience 2

La distribution des estimations de distance étant log-normale, nous avons utilisé le logarithme de l'interdistance estimée comme variable dépendante pour les analyses. Une analyse de variance à mesures répétées 3 x 5 x 2 x 2 (Condition de visibilité x Interdistance x Véhicule cible x Environnement) a été menée. Lorsque l'hypothèse H_0 est rejetée, les tests post-hoc de Newman-Keuls et le calcul de la taille d'effet relative (η^2 partiel) complètent l'analyse.

a. Effets principaux

L'analyse de variance fait apparaître un effet principal de la condition de visibilité ($F(2,14)=4.51$; $p<.05$; $\eta^2=.392$), dans le sens d'estimations plus courtes en condition de visibilité réduite (Figure 19-haut). Les tests post-hoc montrent ($p<.025$) que l'interdistance estimée est plus courte en condition *brouillard silhouette* ($m=14.9$; $\sigma=11.3$) qu'en condition de visibilité normale ($m=20.9$; $\sigma=17.5$). Il y a également un effet principal de l'interdistance ($F(4,28)=164$; $p<.0001$; $\eta^2=.959$) dans le sens d'estimations plus grandes pour les grandes interdistances (Figure 19-bas-gauche). Les tests post-hoc montrent que toutes les conditions diffèrent significativement ($p<.00025$). Les estimations faites pour les interdistances de 7.5,

13, 23, 40, et 70 m sont respectivement de 5.74, 10.1, 16, 22.7, et 33.9 m avec des écarts type de respectivement 2.57, 5.56, 8.52, 12.5, et 18.6. L'analyse fait également apparaître un effet principal du véhicule cible ($F(1,7)=23.6$; $p<.0025$; $\eta^2=.771$) dans le sens d'estimations plus courtes pour le véhicule léger ($m=16.8$; $\sigma=13.7$) que pour le fourgon ($m=18.6$; $\sigma=15.9$) (Figure 19-bas-droite).

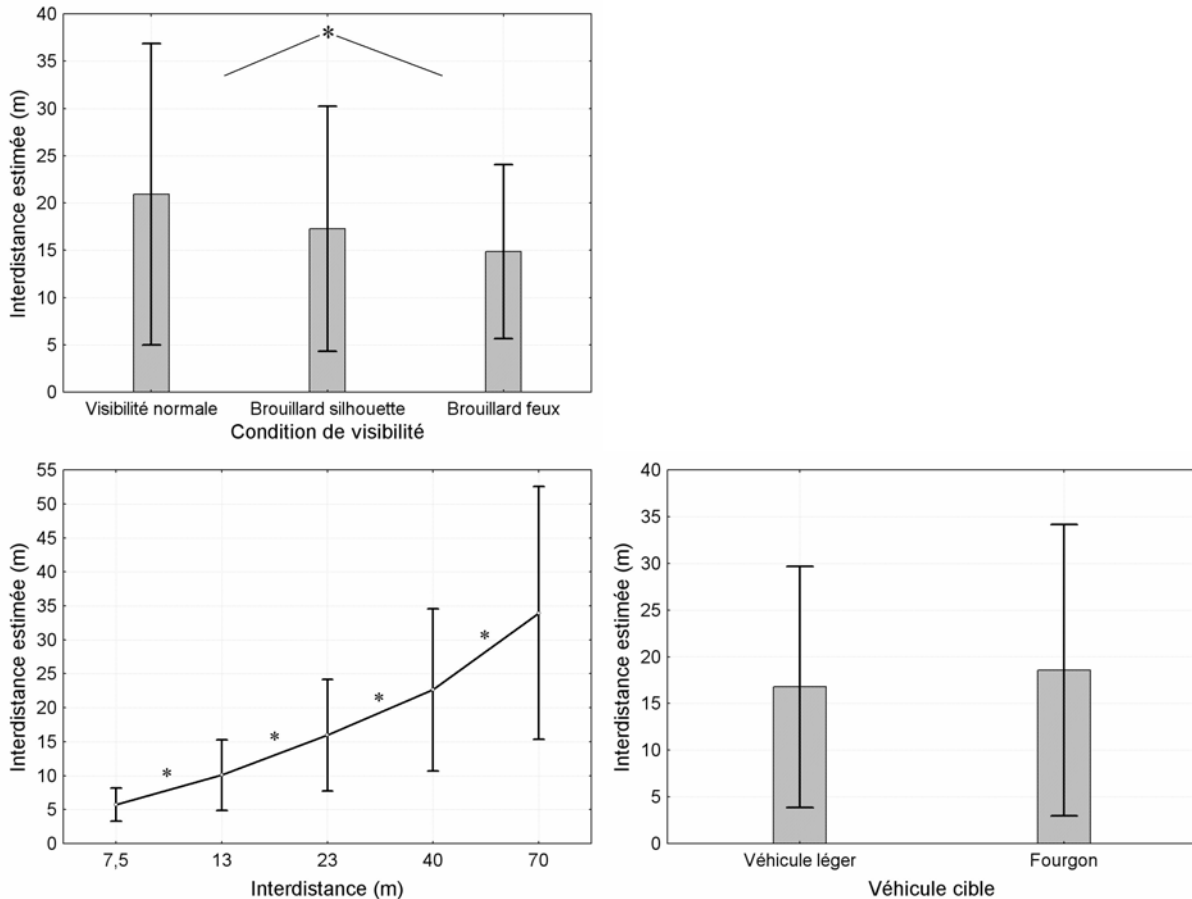


Figure 19 : Haut : Distance estimée en fonction de la condition de visibilité. Bas-gauche : Distance estimée en fonction de l'interdistance. Bas-droite : Distance estimée en fonction du type de véhicule. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

b. Interactions

Il y a une interaction entre la condition de visibilité et l'interdistance ($F(8,56)=2.81$; $p<.025$; $\eta^2=.286$), dans le sens où les estimations sont plus courtes lorsque la visibilité est réduite, uniquement pour les quatre plus grandes interdistances (Figure 20-haut). Les tests post-hoc montrent que les estimations sont plus courtes pour la condition *brouillard feux* que pour la condition de visibilité normale pour les quatre plus grandes interdistances ($p<.00025$), qu'elles sont plus courtes pour la condition *brouillard silhouette* que pour la condition de

visibilité normale pour les trois plus grandes interdistances ($p < .0025$), et qu'elles sont plus courtes pour la condition *brouillard feu* que pour la condition *brouillard silhouette* à 13 et 40 m ($p < .01$).

L'analyse montre également une interaction entre la condition de visibilité et l'environnement ($F(2,14)=4.36$; $p < .05$; $\eta^2=.384$) dans le sens d'estimations plus importantes pour l'environnement uniforme que pour celui avec la chaussée en condition de visibilité normale, mais pas en condition de visibilité réduite (Figure 20-bas). Les tests post-hoc montrent ($p < .0025$) qu'en condition de visibilité normale, l'estimation est plus grande pour l'environnement uniforme ($m=22.8$; $\sigma=18.8$) que pour l'environnement avec chaussée ($m=19$; $\sigma=16$). Par ailleurs, l'estimation est plus courte pour la condition *brouillard feu* que pour les deux autres conditions de visibilité dans les deux environnements ($p < .05$), et elle est plus courte pour la condition *brouillard silhouette* ($m=18$; $\sigma=15.3$) que pour la condition de visibilité normale ($m=22.8$; $\sigma=18.8$) dans l'environnement uniforme ($p < .0025$).

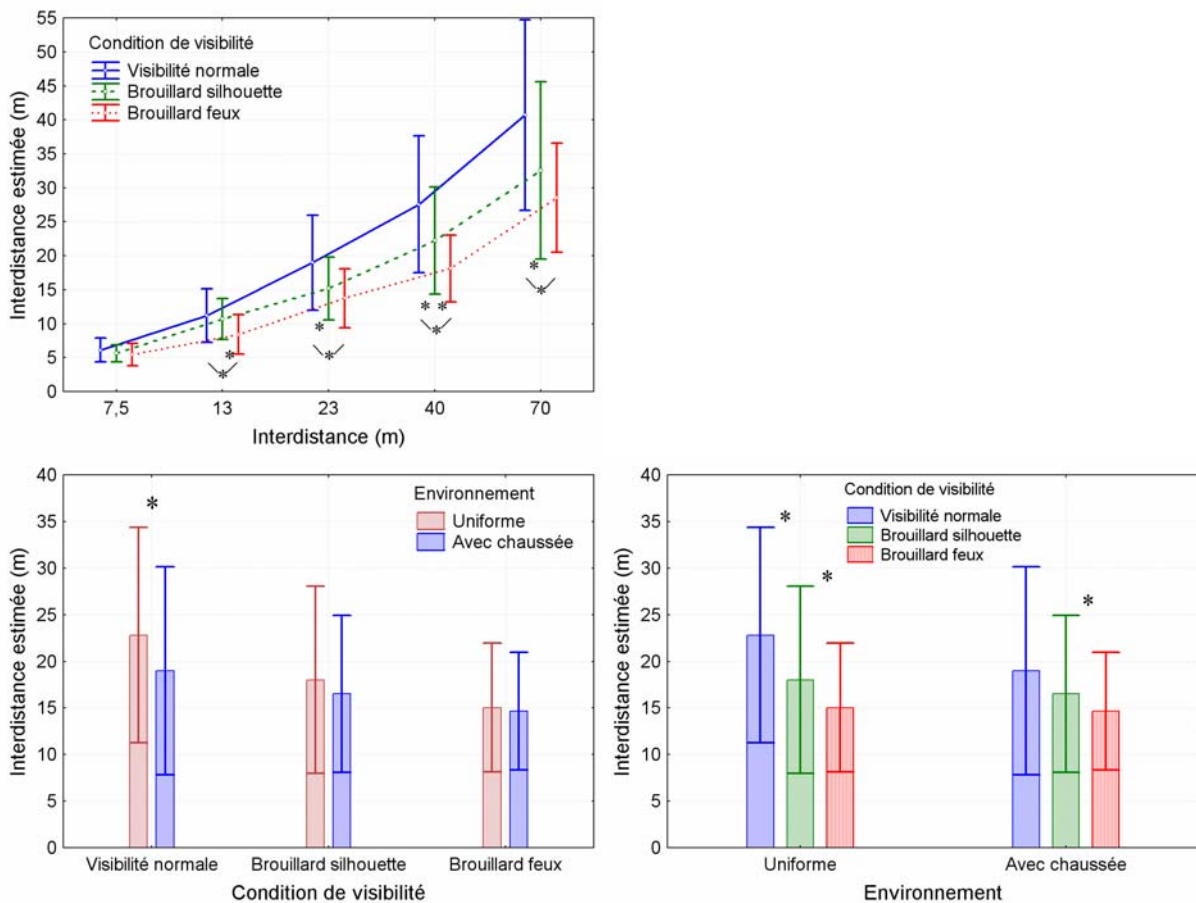


Figure 20 : Haut : Distance estimée en fonction de la condition de visibilité et de l'interdistances. Bas gauche et droite : Distance estimée en fonction de la condition de visibilité et de l'environnement. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls.

Il y a également une interaction entre l'interdistance et le véhicule cible ($F(4,28)=2.8$; $p<.05$; $\eta^2=.286$) (Figure 21-gauche), dans le sens où la différence d'estimation entre les deux véhicules cibles est plus grande à 7.5 et 70 m que pour les autres interdistances (visible sur une échelle logarithmique). Les tests post-hoc montrent que toutes les conditions diffèrent significativement ($p<.005$). L'analyse montre enfin une interaction entre l'environnement et le véhicule cible ($F(1,7)=18$; $p<.005$; $\eta^2=.72$) (Figure 21-droite), dans le sens où la différences d'estimations entre les deux véhicules cibles est plus prononcée dans l'environnement uniforme (visible sur une échelle logarithmique). Les tests post-hoc montrent que toutes les conditions diffèrent significativement ($p<.025$). On notera qu'il n'y a pas d'effet d'ordre pour cette expérience.

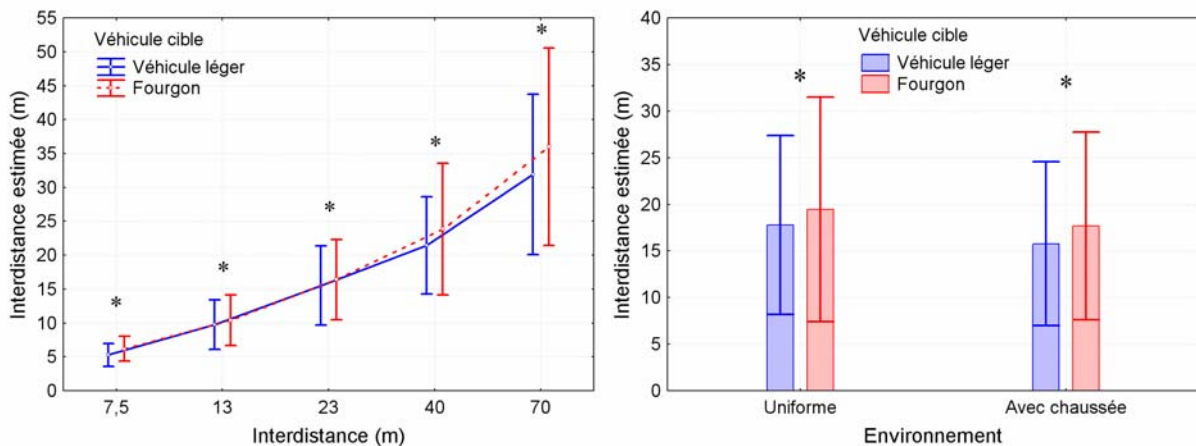


Figure 21 : *Gauche* : Distance estimée en fonction de l'interdistance et du véhicule cible. *Droite* : Distance estimée en fonction de l'environnement et du véhicule cible. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

9.3 Discussion concernant l'expérience 2

9.3.1 Effets observés

a. Condition de visibilité

Cette expérience montre une sous-estimation des interdistances en condition de visibilité réduite (Figure 19-haut), comme l'avait montré l'expérience de Beaudoin (2002). La significativité de cette sous-estimation dépend par ailleurs de plusieurs variables. On constate ainsi que la sous-estimation apparaît pour les quatre plus grandes interdistances mais pas pour celle de 7.5 m (Figure 20-haut). De plus, les estimations faites pour la condition *brouillard*

silhouette ne sont significativement plus courtes que celles faites en condition de visibilité normale que pour l'*environnement uniforme* (Figure 20-bas-droite).

b. Environnement

Les résultats montrent qu'en condition de visibilité normale, les estimations sont plus courtes lorsqu'il y a une chaussée texturée qu'en l'absence de chaussée (Figure 20-bas-gauche). Pourtant, l'expérience 1 présentée ci-dessus ainsi que l'expérience de Cavallo et al. (1999) n'avaient pas montré d'influence de la complexité de l'environnement sur les interdistances estimées. Les éléments de l'environnement manipulés par ces expériences étaient des bâtiments, des arbres, ainsi que la texture de la chaussée. Pour la présente expérience, la texture de la chaussée a été manipulée comme l'avaient fait Cavallo et al. (1999). De plus, les bords de route donnant accès à l'information de perspective linéaire ont également été manipulés, ce qui n'était pas le cas pour les expériences antérieures. La différence de résultats pourrait donc être expliquée par l'absence de bords de route dans l'environnement le plus simple.

Une interprétation possible de l'effet de l'environnement est qu'en l'absence de chaussée, les estimations sont uniquement basées sur les informations liées au véhicule, puisque le sol n'apporte aucune information. On peut penser que lorsque la chaussée est visible, la présence de ces informations supplémentaire modifie la stratégie perceptive qui se baserait alors en partie sur les informations liées au sol. Or, le masquage du sol par le capot du véhicule dans lequel se trouvent les participants est susceptible de modifier la perception des distances. Wu et al. (2004) avaient en effet montré que la distance perçue est plus courte lorsque le bas du champ visuel est masqué, ce qui peut être corroboré par les travaux de Creem-Regehr, Willemsen, Gooch, et Thompson (2005). De façon appliquée au milieu automobile, Evans et Rothery (1976) ont montré qu'une cible placée devant le véhicule est perçue plus proche lorsque le capot du véhicule masque le sol sur une plus grande distance. Ces observations nous conduisent à penser que le masquage de la chaussée proche par le capot du véhicule conduit à des estimations de distances plus courtes. Les estimations seraient alors plus courtes qu'en l'absence de chaussée, où la stratégie perceptive serait différente.

D'après l'interprétation que nous proposons, les estimations plus courtes en présence de la chaussée texturée peuvent être assimilées à une sous-estimation de l'interdistance. De plus, cette sous-estimation apparaît uniquement lorsque la chaussée n'est pas masquée par le brouillard. Il est donc possible que ce phénomène aie contribué à la surestimation des

interdistances en condition de visibilité réduite qui a été observée pour l'expérience 1. Si tel est le cas, cette contribution n'est pas négligeable puisque les estimations sont en moyenne plus grandes de 21% pour l'*environnement uniforme* que pour l'*environnement avec chaussée* (en donnant le même poids aux différents participants et aux différentes interdistances simulées).

c. Véhicule cible

Concernant l'effet du véhicule cible (Figure 19-bas-droite), les estimations plus courtes pour le véhicule léger que pour le fourgon peuvent s'expliquer en condition de visibilité normale et en condition *brouillard silhouette* par l'utilisation de l'information de taille familière. Le véhicule léger et le fourgon utilisés ont approximativement la même largeur alors que les fourgons sont généralement plus larges que les véhicules légers. L'utilisation de l'information de taille familière conduirait alors à percevoir le véhicule léger comme étant plus proche que le fourgon. Nous n'avons en revanche pas pu expliquer la différence de distance perçue entre les deux véhicules pour la condition brouillard feux, d'autant plus que les feux du fourgon sont plus écartés que ceux du véhicule léger.

9.3.2 Différences méthodologiques avec les expériences antérieures

Parmi les six différences méthodologiques recensées entre les expériences de Cavallo et al. (2002) et de Beaudoin (2002), trois n'ont pas été étudiées par la première expérience. Il s'agit de la densité du brouillard, de la gamme des interdistances étudiées, et du caractère statique ou dynamique de la simulation.

La présente expérience, réalisée en condition statique, montre une sous-estimation des interdistances en condition de visibilité réduite comme celle de Beaudoin (2002) qui avait au contraire été réalisée en condition dynamique. On peut donc penser que ce n'est pas le caractère statique ou dynamique de la simulation qui est en cause dans la différence des résultats observés par Cavallo et al. (2002) et Beaudoin (2002). En revanche, la gamme des interdistances étudiées et la densité du brouillard sont similaires pour la présente expérience et pour celle de Beaudoin (2002). Ces deux variables pourraient donc être la cause des résultats contradictoires, d'autant plus que ce sont les deux principales différences entre la présente expérience montrant une sous-estimation de l'interdistance en condition de visibilité réduite et l'expérience 1 qui avait montré une surestimation.

Pourtant, deux autres expériences avaient été menées avec une gamme d'interdistances (8 à 91 m) similaire à celle de la présente expérience et de l'expérience de Beaudoin (2002), et n'avaient cependant pas montré d'effet de la condition de visibilité. Cette nouvelle différence de résultats est peut être due à la plus faible densité de brouillard pour l'expérience de Cavallo et al. (1999), où la Distance de Visibilité Météorologique était de 50 ou 100 m. De plus, les auteurs avaient uniquement traité les conditions où la silhouette du véhicule était visible puisque ses feux de brouillard étaient éteints. Or, la présente expérience ne montre pas de sous-estimation lorsque la chaussée et la silhouette du véhicule sont visibles. Les résultats de la présente expérience ne sont donc pas contradictoires avec ceux obtenus par Cavallo et al. (1999). On constate simplement que même pour les grandes gammes d'interdistances, une sous-estimation n'apparaît que lorsque la silhouette du véhicule est masquée par le brouillard.

10 Discussion concernant l'estimation de la distance intervéhiculaire

10.1 Estimation des distances

Comme nous l'avons vu, la perception des distances est basée sur un certain nombre d'informations de distances qui sont fournies par chacun des éléments de l'environnement. Ces informations sont ensuite combinées de façon à percevoir la distance égocentrée des objets. La complexité des mécanismes de fusion des informations rend les modèles qui les décrivent difficilement utilisables lorsqu'il s'agit de prédire la distance perçue d'une cible dans un environnement complexe. Une telle prédiction est d'autant plus hasardeuse que la distance perçue d'un objet dépend également des informations fournies par les autres objets (Landy et al., 1995), et qu'il existe un certain nombre de phénomènes qui ne sont pas pris en compte par les modèles de fusion d'informations (Harte, 1975 ; He et al., 2004 ; Ohta, 1996 ; Sinai et al., 1998 ; Yang & Purves, 2003). Il est néanmoins possible de prédire l'effet de la modification d'une information, ou au moins de connaître le sens de cet effet. C'est notamment ce qu'ont fait Cavallo et al. (2001) et Buchner et al. (2006) concernant la position des feux de brouillard. De même, l'hypothèse à l'origine de ce travail est qu'en modifiant l'information de la perspective aérienne, le brouillard conduit à augmenter l'interdistance perçue.

10.2 Estimation de l'interdistance en condition de brouillard

Un certain nombre d'études menées en salle de brouillard et sur simulateur visait à déterminer si le brouillard augmente effectivement l'interdistance perçue, et cherchaient plus spécifiquement à déterminer dans quelles conditions et dans quelle proportions (Beaudoin, 2002 ; Buchner et al., 2006 ; Cavallo et al., 1999, 2000, 2001, 2002, 2007). La plupart de ces études s'accordent pour constater la surestimation des interdistances en condition de brouillard. Pourtant, Beaudoin (2002) a au contraire observé une sous-estimation. L'objectif de ce travail était de déterminer l'origine de ces résultats contradictoires et de préciser les conditions d'apparition d'une surestimation, dangereuse en termes de sécurité routière.

En nous basant sur les résultats des deux expériences que nous avons menées, et en nous appuyant sur les résultats des expériences antérieures, il a été possible de mieux cerner l'origine des résultats contradictoires. La sous-estimation observée par Beaudoin (2002) et reproduite par notre seconde expérience, semble être principalement due à la grande gamme d'interdistances étudiées. Pourtant, la seconde expérience montre une sous-estimation des l'interdistance dès 13 m alors que la première expérience a montré une surestimation pour cette même interdistance. Cette différence de résultats résulte peut être de la composante cognitive impliquée dans l'estimation des interdistances. Nous avons en effet vu que les participants ont cherché à maintenir une cohérence sur l'ensemble de leurs réponses. On peut supposer que c'est le cas en particulier pour les essais présentés dans un même bloc, i.e. pour les différentes interdistances d'une même condition de visibilité. Une conséquence possible est que la surestimation ou la sous-estimation se répartisse sur l'ensemble de la gamme des interdistances étudiées.

L'apparition d'une sous-estimation des interdistances est également dépendante d'autres variables. Ainsi, même pour les grandes gammes d'interdistances, il n'apparaît de sous-estimation que lorsque la silhouette du véhicule cible est masquée par le brouillard ou lorsqu'il n'y a pas de chaussée. L'influence de la silhouette et de la chaussée concernant l'apparition d'une sous-estimation n'est pas sans rappeler leur influence en ce qui concerne l'apparition d'une surestimation de l'interdistance. En effet, dans les conditions faisant généralement apparaître une surestimation, il n'a pas été constaté de surestimation lorsque la silhouette du véhicule cible était visible. De même, la surestimation était de moindre amplitude lorsque la chaussée était visible. La première expérience confirme ces résultats, sans toutefois pouvoir différencier l'influence de la silhouette et de la chaussée. Enfin, dans les conditions faisant

apparaître une surestimation des interdistances en condition de brouillard, les expériences réalisées en salle de brouillard montrent que la surestimation est plus importante en condition nocturne qu'en condition diurne (Cavallo et al., 2000).

10.3 Autres interprétations

Les deux expériences présentées dans ce chapitre font apparaître plusieurs phénomènes intéressants. Il semblerait d'une part que les plus grandes estimations faites lorsque le véhicule n'a qu'un feu de brouillard que lorsqu'il en a deux, en condition *brouillard feux*, soient dues à la hauteur du/des feu(x) de brouillard à l'arrière du véhicule. L'information de hauteur dans le champ visuel serait prise en compte de façon plus importante lorsque le véhicule ne possède qu'un feu. Ce phénomène expliquerait par ailleurs l'absence de différence entre les deux configurations de feux pour le véhicule associé à l'environnement simple qui a le(s) feu(x) plus bas.

Il apparaît d'autre part que les estimations sont plus grandes lorsque toutes les sources d'informations liées au sol sont supprimées. Il s'agit notamment de la perspective linéaire basée sur les bords de route et des gradients de texture liés à la chaussée. Ce phénomène pourrait participer à la surestimation observée en condition de brouillard dense, où la chaussée est totalement masquée.

Enfin, la seconde expérience présentée a été réalisée en condition statique, et montre une sous-estimation des interdistances comme l'avait montré l'expérience de Beaudoin (2002) réalisée en condition dynamique. De plus, deux expériences antérieures avaient été réalisées en condition statique pour l'une et en condition dynamique pour l'autre, et aucune des deux n'avait montré d'influence de la condition de visibilité. Il est donc possible que le caractère statique ou dynamique de la simulation n'interagisse pas avec la condition de visibilité.

10.4 Conséquences en termes de sécurité routière

Nous supposons que seule la surestimation de l'interdistance est dangereuse en termes de sécurité routière puisqu'elle peut amener les conducteurs à suivre le véhicule lièvre de plus près. Au contraire, la sous-estimation de l'interdistance amènerait les conducteurs à augmenter l'intervalle, ce qui est bénéfique. Nous avons vu que le brouillard peut conduire à une surestimation des interdistances, mais uniquement pour des brouillards très denses qui

masquaient la chaussée et la silhouette du véhicule. Cette surestimation peut être fortement réduite, voire supprimée, lorsque des informations de distance fiables sont disponibles. Ainsi, Cavallo et al. (2007) observent une surestimation bien plus faible (de 11% en condition nocturne) lorsqu'un tronçon de chaussée est visible devant le véhicule de l'observateur. Or en situation réelle, la conduite n'est pas possible si la chaussée est totalement masquée. De plus, la surestimation disparaît totalement lorsque la silhouette du véhicule cible est visible (Cavallo et al., 2002). Cela signifie qu'en condition de jour (où la silhouette peut être vue), la surestimation disparaîtrait lorsque l'intervalle serait suffisamment court pour que la silhouette soit vue. L'interprétation que nous faisons concernant l'effet d'ordre de l'expérience 1 confirme l'absence de surestimation lorsque la chaussée et la silhouette du véhicule cible sont visibles. Cet effet d'ordre montre par ailleurs que même dans des conditions faisant normalement apparaître une surestimation (i.e. chaussée et silhouette masquées), la surestimation n'apparaît pas si les participants ont pu auparavant voire la silhouette du véhicule. Nous avons enfin vu que lorsque la gamme d'interdistances est grande, le brouillard conduit à une sous-estimation plutôt qu'à une surestimation.

Ces considérations réduisent largement le champ des situations pour lesquelles on peut attendre une surestimation des interdistances en situation de conduite diurne. Il faut en effet que le brouillard soit très dense pour que la silhouette du véhicule suivi ne soit pas visible avec des interdistances courtes ; une sous-estimation pouvant être attendue lorsque les interdistances sont longues. De plus, la surestimation devrait disparaître pour les conducteurs ayant visualisé la silhouette et qui ont pu mémoriser la position des feux par rapport à la silhouette. En revanche, en condition de brouillard nocturne, la surestimation est plus importante (60% en salle de brouillard), et les conducteurs ne peuvent pas voir la silhouette du véhicule suivi. La surestimation de l'interdistance serait donc plus à craindre en condition de nuit. Toutefois, nous avons vu que la surestimation est seulement de 11% lorsqu'un tronçon de chaussée est visible. Une telle surestimation peut être considérée comme modérée puisqu'elle pourrait au maximum expliquer une réduction de l'intervalle de 10%⁷. De plus, les études de trafic avaient montré une réduction des intervalles pratiqués en condition de brouillard nocturne mais également en condition de brouillard diurne (Bulté, 1985 ; White &

⁷ Soit D l'interdistance adoptée en condition de visibilité normale, et un taux de surestimation en condition de brouillard de 11%. Pour que l'interdistance perçue en condition de brouillard corresponde à D , il faut que l'interdistance adoptée soit $0.9 \times D$ (et non pas $0.89 \times D$).

Chapitre 2 : Estimation de la distance intervéhiculaire

Jeffery, 1980). L'hypothèse d'une surestimation des interdistances, telle qu'elle a été formulée, ne peut donc pas expliquer la réduction des intervalles en condition de brouillard. D'autres hypothèses ont été avancées pour expliquer cette réduction des intervalles. On peut notamment citer l'hypothèse d'une altération de la perception du mouvement relatif qui sera étudiée dans le chapitre suivant à travers une expérience de mesure de seuil perceptif.

Chapitre 3 : Seuil de perception du mouvement relatif

1 Introduction

Nous avons vu au chapitre 2 que la réduction des intervalles en condition de brouillard n'est probablement pas due à une surestimation des interdistances. Dans le présent chapitre, nous envisageons une autre hypothèse se référant à la perception du mouvement relatif qui pourrait être affectée par le brouillard. Déjà White et Jeffery en 1980 supposaient que les conducteurs ayant une mauvaise vue seraient amenés à suivre de plus près par temps de brouillard pour obtenir des indices visuels sur la décélération du véhicule lièvre. D'une façon plus générale, nous faisons l'hypothèse que le brouillard augmente les seuils de détection du rapprochement et de l'éloignement du véhicule lièvre. La diminution de l'interdistance pourrait ainsi être un moyen pour le conducteur d'améliorer sa sensibilité au mouvement relatif. La réduction du temps de réaction du conducteur pourrait être doublement bénéfique. Une réaction rapide est d'abord un élément clé quand il s'agit d'éviter une collision avec le véhicule suivi (e.g., Probst, Krafczyk, & Brandt, 1987) ; elle est d'autant plus importante par temps de brouillard où la décélération du véhicule lièvre ne peut être anticipée. D'autre part, une meilleure détection des accélérations permet de garder plus facilement le véhicule lièvre en vue, ce qui est susceptible de faciliter le contrôle directionnel (cf. chapitre 5). D'une façon générale, la réduction des seuils de perception du mouvement relatif permettrait de réguler l'intervalle de façon plus fine, se traduisant par des variations réduites de l'interdistance et par des vitesses relatives plus faibles.

1.1 Mécanismes de perception du mouvement

1.1.1 *Trois niveaux de perception*

La perception d'un mouvement peut être décomposée en plusieurs niveaux, donnant lieu à différents seuils perceptifs mesurés avec des tâches différentes. On peut distinguer la détection d'un mouvement et la discrimination du sens de ce mouvement. Ainsi en se basant uniquement sur les informations binoculaires, Sumnall et Harris (2002) observent des seuils

plus élevés pour la discrimination entre l'éloignement et le rapprochement que pour la détection du déplacement. Bonnet (1975) observe le même phénomène avec des mouvements dans le plan frontoparallèle. La détection du mouvement et la discrimination de son sens correspondraient selon lui à deux niveaux d'un même phénomène psychophysique.

D'autre part, Hoffmann et Mortimer (1996) font la distinction entre la détection d'un mouvement et la perception de sa vitesse, et mettent en avant le fait qu'un mouvement puisse être détecté sans que sa vitesse ne soit perçue. Il existerait selon eux un seuil de vitesse angulaire en dessous duquel la vitesse des mouvements ne serait pas perçue directement. Il est possible que la perception de la vitesse du mouvement repose sur des mécanismes différents de ceux de la discrimination du sens du mouvement, au moins pour les mouvements dans le plan frontoparallèle (Kohly & Regan, 1999 ; Portfors-Yeomans & Regan, 1996). Dans ce chapitre l'intérêt sera porté sur la discrimination du sens du mouvement, puisqu'en situation de suivi de véhicule il est d'abord nécessaire de connaître le sens du mouvement relatif pour pouvoir réagir. La discrimination du sens du mouvement a par ailleurs été largement étudiée ; nous pourrions ainsi nous appuyer sur les travaux existants (e.g. Probst, Krafczyk, & Brandt, 1987 ; Probst, Krafczyk, Brandt, & Wist, 1984 ; Santos, Noriega, & Albuquerque, 1997, 1999).

1.1.2 Mécanismes de perception du mouvement

Nous nous intéressons aux mouvements qui ont lieu dans le plan sagittal tels que l'éloignement et le rapprochement du véhicule suivi. Certains auteurs ont étudié la perception des mouvements dans le plan sagittal à travers la disparité binoculaire (Gray & Regan, 1996 ; Portfors-Yeomans & Regan, 1996 ; Sumnall & Harris, 2002). Comme nous l'avions évoqué au chapitre précédent (cf. Informations de distance, page 32), la disparité binoculaire ne peut pas être utilisée, ou seulement de façon imprécise, pour de grandes distances telles que les distances intervéhiculaires. Cette source d'information n'est donc pas pertinente dans la situation étudiée.

Dans une étude visant à déterminer les informations qui donnent lieu à une perception de mouvement en profondeur, Gray et Regan (1996) indiquent que la sensation de mouvement en profondeur est qualitativement identique pour les variations de disparité binoculaire et les variations de taille angulaire. La variation de la taille angulaire d'un objet, qui est une information bidimensionnelle, peut donc à elle seule donner lieu à une perception de

mouvement en profondeur. Il reste néanmoins à déterminer quels sont les mécanismes sous-jacents. Regan, Kaufman, et Lincoln (1986) et Gray et Regan (2000) précisent ces travaux en proposant un modèle à trois niveaux. Le premier niveau de ce modèle correspond aux détecteurs locaux qui détectent le mouvement dans des zones précises du champ de vision (i.e. dans leur champ récepteur respectif). Les informations fournies par ces détecteurs locaux sont traitées par le second niveau du modèle, qui renseigne alors sur l'expansion ou la contraction d'une cible. Enfin, le troisième niveau du modèle utilise l'information d'expansion/contraction pour donner lieu à une perception de mouvement en profondeur. Les mécanismes spécialisés dans la perception des mouvements dans le plan sagittal, mentionnés par certains auteurs (e.g. Cumming, 1994 ; Regan & Beverley, 1978), pourraient donc correspondre au troisième niveau de ce modèle.

La perception des mouvements dans le plan sagittal et la perception de l'expansion/contraction (i.e. des mouvements dans le plan frontoparallèle) semblent reposer en partie sur des mécanismes communs. Il est donc possible que certaines caractéristiques du traitement des mouvements dans le plan frontoparallèle se retrouvent dans le traitement des mouvements dans le plan sagittal. Nous allons présenter deux mécanismes qui permettent la perception des déplacements dans le plan frontoparallèle (Bonnet, 1975, 1984 ; Leibowitz, 1955 ; Seiffert & Cavanagh, 1998, 1999). On considère ici que le déplacement d'un objet implique d'une part une phase de mouvement de cet objet et d'autre part un changement de position par rapport à sa position initiale. L'un des mécanismes (*velocity-sensitive mechanism*, Seiffert & Cavanagh, 1998) serait déclenché par la phase de mouvement. D'après Seiffert et Cavanagh, il serait basé sur des détecteurs de bas niveau sensibles à la vitesse et traiterait ainsi la vitesse du stimulus. L'autre mécanisme (*position-sensitive mechanism*) serait déclenché par les composantes stationnaires de la translation, c'est-à-dire qu'il détecterait le changement de position de l'objet observé. Il s'agirait selon Seiffert et Cavanagh d'un mécanisme de haut niveau. Il semblerait que l'un ou l'autre des deux systèmes soit prédominant selon les caractéristiques du stimulus. Bonnet a notamment observé une prédominance du mécanisme sensible à la vitesse pour les déplacements rapides, avec de petits objets, et une faible luminance, et une prédominance du mécanisme sensible à la position lorsque le déplacement contient des positions stationnaires et lorsqu'il y a une référence stationnaire proche de l'objet en déplacement. Ces deux mécanismes fonctionnant en parallèle, ce serait le plus sensible des deux, pour un stimulus donné, qui détecterait le déplacement en premier. Seiffert et Cavanagh suggèrent enfin que du fait de sa lenteur et de la

charge cognitive qu'il implique, le système de détection du changement de position serait une alternative au système sensible à la vitesse. Plusieurs éléments nous laissent penser que ces deux types de mécanismes pourraient également exister pour la perception des mouvements dans le plan sagittal. Les mouvements lents et les mouvements rapides pourraient ainsi être traités par des mécanismes différents, et la présence d'une référence stationnaire proche de l'objet en mouvement pourrait être utilisée dans le cas des mouvements lents. Ce dernier point est confirmé par les travaux de Santos et al. (1997).

1.1.3 Travaux antérieurs

De nombreux auteurs se sont intéressés à la perception du mouvement relatif en situation de suivi d'un véhicule (Boer, 1999b ; Duckstein, Unwin, & Boyd, 1970 ; Evans & Rothery, 1974, 1977 ; Janssen, 1973 ; Janssen, Michon, & Harvey, 1976 ; Lamble, Kauranen, Laakso, & Summala, 1999 ; Matsuki, Shidoji, & Matsunaga, 2001 ; Mortimer, 1971 ; Probst, 1986 ; Probst, Krafczyk, & Brandt, 1987 ; Probst, Krafczyk, Brandt, & Wist, 1984 ; Santos, 1997 ; Santos, Berthelon, & Mestre, 2002 ; Santos et al., 1997, 1999 ; Santos, Noriega, Correia, Campilho, & Albuquerque, 2000 ; Summala, Lamble, & Laakso, 1998). Ces travaux s'accordent pour constater le rôle prépondérant de la distance de suivi et de la vitesse relative : la sensibilité au mouvement relatif (en termes de temps de réponse) est d'autant plus grande que la distance intervéhiculaire est courte et la vitesse relative élevée (e.g., en cas de freinage fort du véhicule suivi). Plusieurs modèles ont été proposés pour rendre compte de l'influence de ces deux variables. Le modèle le plus simple correspond à une loi de Weber⁸ sur la taille angulaire du véhicule (Duckstein, Unwid, & Boyd, 1970 ; Evans & Rothery, 1974 ; Mortimer, 1971). Le mouvement est ainsi détecté lorsque la taille angulaire du véhicule a varié d'une certaine proportion, appelée rapport de Weber. D'après la loi de Weber, le rapport de Weber est constant, indépendamment des différentes variables impliquées (i.e. vitesse relative et interdistance dans le cas présent). Ce rapport serait de 7% selon Duckstein et al. et de 12%

⁸ Weber s'est intéressé au seuil différentiel, i.e. à la plus petite variation de l'intensité d'un stimulus pouvant être détectée par un observateur (généralement notée JND - Just Noticeable Difference). Selon la loi de Weber, la variation ΔI pouvant être détectée est proportionnelle à l'intensité I du stimulus : $\frac{\Delta I}{I} = K$ où K est une constante. Cette relation est observée pour de nombreuses grandeurs appartenant aux différentes modalités perceptives.

selon Mortimer. En faisant une légère approximation⁹, on peut considérer que la distance du véhicule varie à l'inverse de sa taille angulaire. La loi de Weber apparaît donc également sur la distance intervéhiculaire. Evans et Rothery proposent une autre modélisation où le seuil de perception correspond à une valeur constante de la vitesse relative divisée par l'interdistance (correspondant à une valeur constante de la variable optique τ). Enfin, Boer (1999b) propose un modèle statistique de la détection du changement de taille angulaire du véhicule suivi. Selon ce modèle, la détection a lieu lorsque la taille angulaire perçue de la cible diffère significativement de la représentation interne que le participant a de la taille angulaire initiale. Le modèle est basé sur des limitations perceptives et prend en compte trois processus : l'incertitude sur la taille angulaire de la cible, la diminution de cette incertitude par un processus d'intégration du bruit, i.e. accumulation de l'information, et l'augmentation avec le temps de l'incertitude concernant la taille angulaire initiale à cause de l'effacement de la mémoire. Ce modèle permet de calculer la probabilité de détection à un instant donné.

Comme nous venons de le voir, les modèles existants cherchent à rendre compte de l'influence de la distance de suivi et de la vitesse relative sur la perception du mouvement relatif. Cependant, plusieurs travaux indiquent que l'angle visuel du véhicule suivi n'est pas la seule information visuelle prise en compte, mais que la perception des informations environnementales interagit avec le traitement de l'information issue du véhicule lièvre. Les travaux de Probst (1986) et de Probst et al. (1984, 1987) ont montré que la sensibilité au mouvement relatif diminue en présence d'un flux optique concurrent accompagnant le mouvement propre de l'observateur. Boer (1999b), Santos (1997), et Santos et al. (1999) ont obtenu des résultats similaires. En manipulant la texture de la chaussée, ils observent que la sensibilité au mouvement relatif diminue lorsque la quantité de flux optique global augmente. De façon corollaire, la perception du mouvement relatif en situation nocturne réelle n'est pas détériorée par rapport à une situation de laboratoire sans flux environnemental, car l'influence du flux optique environnemental est très réduite pour ces conditions (Harvey & Michon, 1971, 1974 ; Janssen, 1973 ; Janssen, Michon, & Harvey, 1976). D'autres auteurs observent

⁹ La taille angulaire θ [Rad] du véhicule est donnée par : $\theta = 2 \cdot \text{Atan}\left(\frac{L}{2d}\right)$ où L correspond à la largeur du véhicule [m] et d à sa distance visuelle [m]. Le Développement Limité à l'ordre 1 de la fonction Atan conduit à l'approximation suivante : $\theta \approx \frac{L}{d}$. L'erreur engendrée par cette approximation est d'autant plus faible que l'interdistance est grande, et est d'environ 0.3% pour une distance visuelle de 10 m.

même une réduction du seuil perceptif en situation nocturne par rapport à une situation diurne équivalente (Todosiev & Fenton, 1966). Notons cependant que Santos et al. (2000, 2002) n'observent pas une détérioration générale liée au flux optique global, mais distinguent des effets de facilitation et de détérioration selon que le véhicule lièvre s'éloigne ou se rapproche. Cet effet différentiel peut être expliqué par la structure du flux optique. Dans le cas de l'éloignement, les vecteurs du flux optique environnemental et du véhicule lièvre pointent dans des directions opposées, facilitant ainsi la détection du mouvement. En revanche, dans le cas du rapprochement, les vecteurs vitesse de l'environnement et du véhicule vont dans la même direction, ce qui rend la détection du mouvement plus difficile.

A part le changement de taille angulaire du véhicule lièvre et les interactions avec le flux optique global, d'autres informations visuelles liées au véhicule lièvre et à l'environnement peuvent intervenir. Ainsi, par temps de brouillard, l'éloignement et le rapprochement du véhicule lièvre s'accompagnent respectivement d'une diminution et d'une augmentation de son contraste, ce qui constitue une source d'informations potentielle. Par ailleurs, Santos et al. (1997) montrent qu'une référence stationnaire dans le champ visuel de l'observateur, proche de la base du véhicule lièvre (e.g. le capot de son propre véhicule) peut améliorer marginalement la détection du mouvement relatif. Une autre source d'information potentielle est la différence de vitesse angulaire entre les bords du véhicule lièvre et la texture adjacente de l'environnement.

1.1.4 Mécanismes cognitifs

Nous venons de voir que le seuil de perception du mouvement relatif dépend de différents facteurs perceptifs liés au véhicule et à l'environnement. Les mécanismes cognitifs en jeu dans le traitement des informations perçues peuvent également influencer la mesure du seuil. Ainsi, le modèle de Boer (1999b) décrit ci-dessus s'insère dans des modèles plus généraux qui concernent les tâches de choix perceptifs. D'après ces modèles, l'information perçue est accumulée au cours du temps. Cette accumulation permet d'augmenter la certitude sur le stimulus perçu en intégrant le bruit. Vickers (1970) est l'un des premiers à avoir proposé ce type de modèle. Ces modèles ont par la suite été perfectionnés de façon à mieux représenter les processus de décision. Usher et McClelland (2001) intègrent ainsi, comme l'avait fait Boer, un mécanisme de fuite à leur modèle. Ce mécanisme conduit à une diminution de l'activation des unités de décision lorsque aucune information supplémentaire n'est accumulée. Les unités de décision ont pour but de déclencher l'une des réponses possibles

lorsqu'il y a suffisamment d'information accumulée en faveur de cette réponse. Le modèle de Usher et McClelland comporte également un mécanisme d'inhibition mutuelle entre les unités de décision, permettant de favoriser la réponse qui a le plus d'information accumulée vis à vis des autres réponses. Les deux mécanismes intégrés au modèle de Usher et McClelland rendent le processus de décision complexe, en particulier en ce qui concerne l'ordre temporel des informations accumulées.

Il existe par ailleurs un critère de décision, qui est l'un des éléments centraux de la Théorie de la Détection du Signal (e.g. Bonnet, 1986). Ce critère de décision vise à rendre compte de la stratégie adoptée par les participants. Ainsi, les participants ne répondant que lorsqu'ils sont sûrs auront un critère de décision élevé, et ceux répondant au hasard auront un critère de décision faible. On constate au regard de la complexité des processus de décision, que la réponse des participants à une mesure du seuil de perception du mouvement ne dépend pas uniquement des mécanismes perceptifs. La réponse dépend également des aspects cognitifs, et notamment du critère de décision. Nous chercherons toutefois, conformément à l'objectif de ces travaux, à nous limiter à l'étude des phénomènes perceptifs.

1.2 Influence du brouillard ?

Plusieurs travaux mettent en évidence l'influence du contraste sur la vitesse perçue des mouvements dans le plan frontoparallèle, allant généralement dans le sens d'une vitesse perçue plus lente lorsque le contraste est plus faible (Anstis, 2003 ; Thompson, Brooks, & Hammett, 2006). La réduction du contraste diminue également la vitesse perçue dans le cas de mouvements d'expansion/contraction simulant le mouvement d'un objet dans le plan sagittal (Blakemore & Snowden, 1999). De plus, les travaux de Burr, Fiorentini, et Morrone (1998) montrent que le seuil de perception est directement lié à la vitesse perçue pour des mouvements dans le plan frontoparallèle. Il pourrait donc en être de même pour les mouvements dans le plan sagittal. D'autres travaux montrent que le seuil de perception est plus élevé pour les faibles contrastes, dans des tâches de détection du mouvement (Burr & Corsale, 2001) et de discrimination du sens du mouvement (Edwards, Badcock, & Nishida, 1996) dans le plan frontoparallèle. Hoppe et Lauer (1951) montrent que la discrimination entre l'éloignement et le rapprochement d'un véhicule est d'autant plus facile que la luminosité de celui-ci est importante et donc que le contraste est fort. Enfin, Yonas et Zimmerman (2006) ont observé des seuils de discrimination entre l'éloignement et le rapprochement plus élevés

lorsque le contraste est réduit. L'ensemble de ces résultats suggère que le seuil de perception du mouvement relatif pourrait être plus élevé en condition de brouillard où le contraste est réduit.

Un autre facteur, lié aux caractéristiques visibles du véhicule suivi, pourrait également contribuer à augmenter le seuil de perception du mouvement relatif en condition de brouillard. L'effet du brouillard sur la distance de visibilité des objets (Paulmier, 2004) nous amène à distinguer les situations pour lesquelles le véhicule est visible à la fois par sa silhouette et par ses feux de brouillard, et les situations pour lesquelles il n'est visible que par ses feux. La distinction entre ces deux situations est importante non seulement pour la perception de l'interdistance (Cavallo et al., 2000, 2001), mais aussi pour la perception du mouvement relatif, puisque les informations disponibles ne sont pas les mêmes. Les travaux de Probst et al. (1987) et de Santos et al. (1997) vont dans le sens de seuils équivalents lorsque la silhouette du véhicule est visible et lorsqu'elle ne l'est pas. Cependant, ces auteurs ont utilisé des représentations de véhicules très simplifiées, qui ne prennent pas en compte les feux arrière et leurs caractéristiques. Or, l'écartement entre les deux feux arrière est généralement plus petit que la largeur du véhicule. La plus petite taille angulaire, lorsque la silhouette est masquée, conduit à une vitesse angulaire réduite susceptible d'augmenter le seuil de perception. Les travaux de Janssen et al. (1976) montrent effectivement qu'en condition de nuit, l'écartement entre les deux feux arrière est la principale information utilisée pour la perception du mouvement relatif, et que le seuil est plus élevé lorsque l'écartement est réduit.

Nous venons de voir que le brouillard est susceptible d'augmenter le seuil de perception du mouvement relatif par ses effets sur le véhicule suivi. Or, un effet opposé peut être attendu par l'impact du brouillard sur la visibilité de l'environnement et notamment sur la perception du flux optique créé par le mouvement propre du conducteur. Le brouillard atténue en effet le flux optique global du au mouvement propre. L'interférence évoquée précédemment (cf. Travaux antérieurs, page 86) entre le flux optique global et le flux optique local issu du véhicule lui-même devrait ainsi être réduite, et rendre plus facile la perception du mouvement relatif.

1.3 Hypothèses

Le brouillard est susceptible d'avoir deux effets antagonistes sur la sensibilité au changement d'intervalle : un effet local négatif du à la réduction du contraste de la silhouette

du véhicule par rapport au fond, et à la plus petite taille angulaire lorsque la silhouette est masquée et que seuls les feux du véhicule restent visibles. Au contraire, un effet global positif peut être attendu, du à la réduction du flux optique environnemental. Ces effets opposés sont susceptibles de se combiner dans une situation de suivi de véhicule, mais leur poids respectif dans la perception du mouvement relatif reste à évaluer. Notre hypothèse est que l'effet local l'emporte sur l'effet global, conduisant à une diminution d'ensemble de la sensibilité au mouvement relatif. Afin de déterminer dans quelles conditions et dans quelles proportions le brouillard affecte le seuil de discrimination entre l'éloignement et le rapprochement, nous avons réalisé deux expérimentations avec un paradigme de temps de réponse. Le temps de réponse peut être utilisé comme mesure indirecte du seuil de discrimination entre l'éloignement et le rapprochement, comme le suggèrent Evans et Rothery (1974, 1977).

2 Expérimentation 1

2.1 Méthode

2.1.1 *Participants*

Douze participants (cinq hommes et sept femmes) ayant entre 24 et 36 ans, ont participé à l'expérimentation. Ils étaient titulaires du permis de conduire depuis au moins deux ans et avaient une vision normale ou corrigée à la normale, conformément au Code de la Route français.

2.1.2 *Matériel*

L'expérience a été réalisée sur le simulateur de conduite de l'INRETS. Le système d'affichage composé de trois écrans plats de 2.7 m de largeur et 2.2 m de hauteur permettait un angle de vision total de 150° dans le sens horizontal et de 45° dans le sens vertical. La résolution des images projetées était de 1280x960 pixels pour chaque écran. Cette résolution correspond à un angle de 2.7 minutes d'arc par pixel pour les participants qui étaient placés à 2.7 m de l'écran central. La fréquence de rafraîchissement des images était de 37.5 Hz. D'autre part, le changement de couleur des pixels au bord du véhicule se fait de façon progressive. Il n'y a donc pas de changement soudain de la couleur des pixels susceptible d'être utilisé par les participants.

Chapitre 3 : Perception du mouvement relatif

L'environnement simulé se composait d'une route en ligne droite de 7 m de large avec une chaussée texturée, de bas-côtés verts, et d'arbres plantés sur les bas-côtés (Figure 22). Le véhicule lièvre était une voiture noire de 1.87 m de large et de 1.55 m de hauteur. Ses deux feux de brouillard espacés de 1.24 m et placés à 0.64 m au-dessus du sol étaient allumés en condition de brouillard. L'allumage des feux stop n'était pas simulé. La vitesse initiale du véhicule lièvre et du véhicule suiveur était de 13.9 m/s (50 km/h). Le brouillard était diurne, et il était simulé par une fonction OpenGL produisant une atténuation exponentielle du contraste en fonction de la distance, conformément à la loi de Koschmieder. La prise en compte de la diffusion de la lumière a permis d'améliorer cette fonction en simulant les halos apparaissant autour des feux (Dumont & Cavallo, 2004). Le ciel était du même gris que le brouillard.

Chapitre 3 : Perception du mouvement relatif

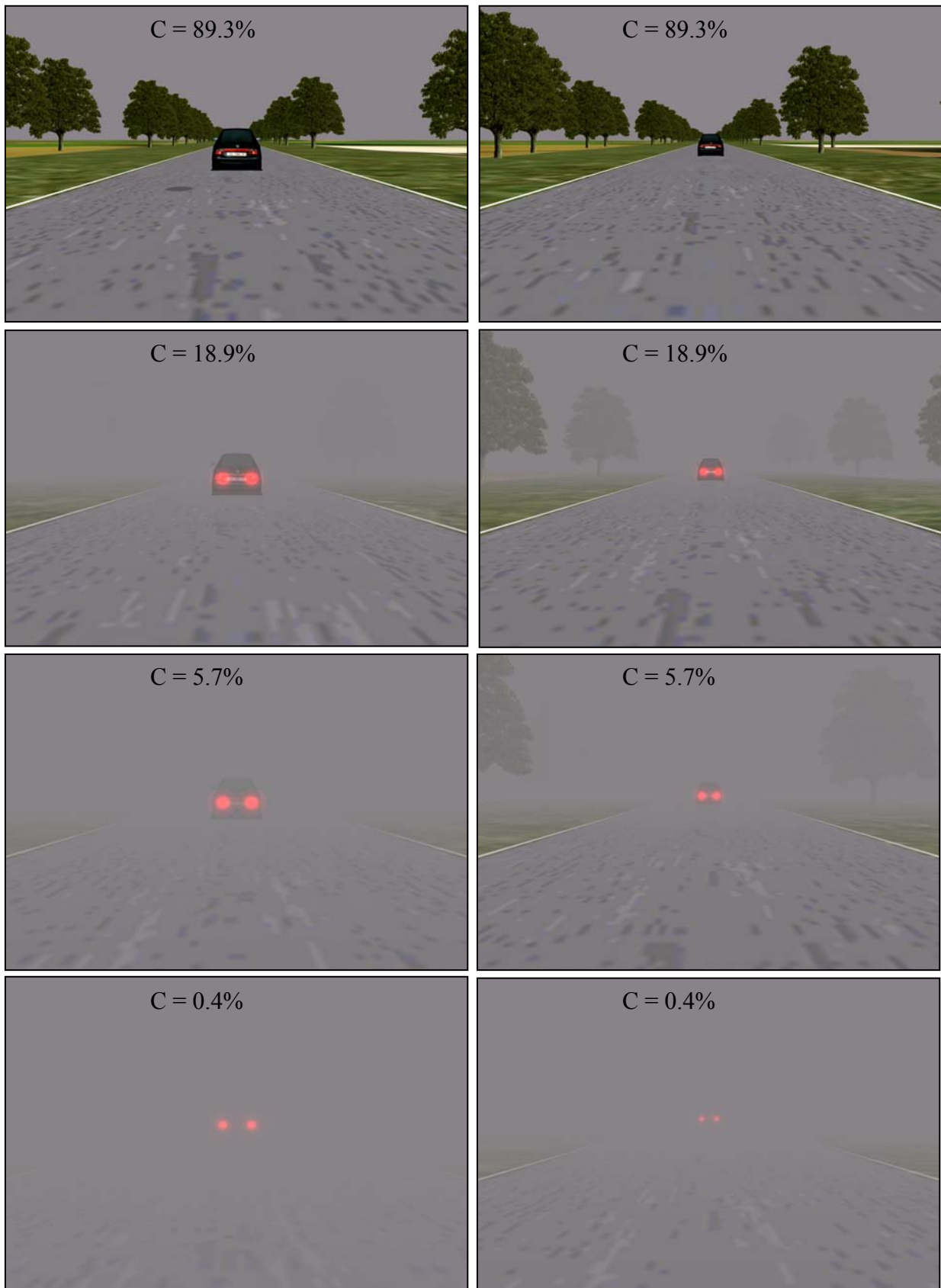


Figure 22 : Captures de l'écran central du simulateur représentant la route et le véhicule lièvre vu de l'arrière. Le contraste C entre la silhouette du véhicule et le fond est indiqué sur chaque image. Les images de gauche correspondent à une interdistance de 16 m et celles de droite à une interdistance de 32 m.

2.1.3 Conditions expérimentales

Nous avons utilisé quatre variables indépendantes qui étaient l'interdistance, le contraste entre le véhicule lièvre et le fond, l'accélération du véhicule lièvre, et le sens du mouvement relatif. Le véhicule cible était suivi avec une interdistance de 16 ou de 32 m (ces interdistances correspondaient à des temps intervéhiculaires de 1.15 et 2.3 s). Les quatre conditions de contraste étaient définies de la façon suivante : Il y avait une condition sans brouillard correspondant à un contraste de 89.3% entre le véhicule cible et le fond¹⁰. Il y avait deux conditions de brouillard pour lesquelles la silhouette du véhicule cible était visible avec des contrastes de 18.9% et de 5.7% par rapport au fond. Pour ces deux conditions, les feux de brouillard étaient également visibles. Il y avait enfin une condition pour laquelle le véhicule cible n'était vu que par ses feux arrière de brouillard puisque le contraste théorique entre la silhouette et le fond n'était que de 0.4% (Figure 22). Les différentes conditions de contraste impliquent l'utilisation de différentes densités de brouillard. Lors de notre expérience, la Distance de Visibilité Météorologique était comprise entre 8 et 64 m pour les conditions de brouillard et était infinie pour la condition sans brouillard (Tableau 4). Enfin, le mouvement relatif pouvait être une accélération ou une décélération de 0.7, 3, ou 7 m/s². Ces valeurs correspondent respectivement aux décélérations du frein moteur (Mortimer, 1971), d'un freinage moyen, et d'un freinage d'urgence. Nous avons choisi d'utiliser des accélérations constantes plutôt que des vitesses relatives constantes par souci de réalisme. En effet, en situation réelle on ne peut observer que des accélérations (positives ou négatives), même lors d'un freinage soudain. La vitesse relative augmente alors avec le temps. Au contraire, dans le cas d'une vitesse relative constante, la différence de vitesse entre les deux véhicules passe instantanément de 0 m/s à une valeur donnée, ce qui n'est physiquement pas possible.

¹⁰ Il s'agit de la valeur absolue du contraste, où le contraste C entre le véhicule de luminance L_v et le fond de luminance L_f est donné par : $C = (L_v - L_f) / L_f$. Par ailleurs, la couleur et la luminance moyenne de la chaussée et du ciel étaient proches de celles du brouillard. La luminance du fond L_f , utilisée pour le calcul du contraste, était donc la même par temps clair et en condition de brouillard.

| | | Contraste silhouette/fond | | | |
|-----------------|----|---------------------------|-------|------|-------------------------|
| | | 89.3% (temps clair) | 18.9% | 5.7% | 0.4% (feux visibles) |
| Distance (m) | 16 | ∞ | 32 | 16 | 8 |
| | 32 | ∞ | 64 | 32 | 16 |

Tableau 4 : Distance de Visibilité Météorologique (m) en fonction du contraste souhaité entre la silhouette du véhicule noir et le fond (%) et de la distance du véhicule (m). Le calcul a été fait avec la loi de Koschmieder.

2.1.4 Tâche

Nous avons utilisé une tâche de choix forcé à deux alternatives où les participants devaient discriminer le sens du mouvement. Il leur était demandé d'appuyer sur l'un des deux boutons du boîtier réponse pour indiquer si le véhicule lièvre s'éloignait ou se rapprochait. Ils devaient répondre dès que possible et sans faire d'erreurs, et aucun feedback ne leur était communiqué. La consigne donnée aux participants est présentée en Annexe 3 (page 266).

La mesure d'un temps de réponse sous forme d'un temps de réaction de choix, est plutôt écologique puisqu'on y retrouve les mêmes sous tâches qu'en situation réelle : observer la scène visuelle, déterminer à chaque instant si le véhicule suivi s'éloigne ou se rapproche, et enfin avoir une réaction adaptée au sens du mouvement. On sait d'autre part que le temps de réaction à une décélération du véhicule lièvre est l'un des problèmes clés de l'activité de conduite. Nous avons donc mesuré un temps de réponse comme l'avaient déjà fait plusieurs d'auteurs (Boer, 1999b ; Mortimer, 1971 ; Probst, 1986 ; Probst, Krafczyk, & Brandt, 1987 ; Santos, Noriega, & Albuquerque, 1997, 1999 ; Summala, Lamble, & Laakso, 1998). Par ailleurs, le boîtier réponse était tenu de façon à ce que l'un des boutons soit proche du participant et l'autre plus éloigné. Le bouton le plus proche était utilisé lorsque le véhicule lièvre se rapprochait et le plus éloigné lorsqu'il s'éloignait. Certains travaux montrent en effet l'importance de la compatibilité entre le stimulus et la réponse sur la rapidité et l'exactitude des réponses données (Gerred Marble & Proctor, 2000 ; Grosjean & Mordkoff, 2001).

2.1.5 Procédure

L'expérience était composée de deux sessions d'environ une heure. Lors de la première session, les participants ont lu la feuille d'information (Annexe 3, page 265) et signé le formulaire de consentement éclairé. Leur vue a ensuite été vérifiée à l'aide d'un appareil Ergovision. Nous avons ensuite mesuré le temps de réaction de choix des participants pour

une tâche simple : les participants devaient appuyer sur le bouton gauche du boîtier réponse dès qu'un objet apparaissait à gauche, et inversement lorsque l'objet apparaissait à droite. L'objet avait un fort contraste, une grande taille angulaire (17°), et les deux positions d'apparition étaient bien distinctes (27° d'angle visuel). Les participants ont ensuite passé un bloc de familiarisation à la tâche de discrimination du sens du mouvement composé d'une vingtaine d'essais représentatifs de l'ensemble des conditions étudiées.

L'expérience à proprement parler comportait 48 conditions expérimentales correspondant à la combinaison de quatre conditions de contraste, deux interdistances, trois accélérations, et deux sens de mouvement. Chaque condition expérimentale a été répétée six fois, ce qui donne 288 essais expérimentaux. Les quatre conditions de contraste ont été présentées par blocs et dans un ordre contrebalancé (Annexe 4, page 268). Deux blocs de contraste étaient passés lors de la première session et les deux autres lors de la seconde session. Chaque bloc de contraste comprenait trois sous-blocs de 26 essais. Chaque sous-bloc commençait par deux essais non pris en compte. Les 24 essais suivants correspondaient à la combinaison de deux interdistances, trois accélérations, et des deux sens de mouvement, présentés dans un ordre aléatoire et répétés une seconde fois dans l'ordre inverse. Les blocs et sous-blocs étaient séparés par des pauses. Le déroulement de la seconde session était identique à celui de la première session. Elle commençait par un nouveau bloc de familiarisation et se terminait par un questionnaire post-expérimental (Annexe 3, page 267).

Chaque essai commençait par la présentation d'une scène visuelle montrant une situation de suivi de véhicules dans laquelle le participant se trouvait dans le véhicule suiveur. Le véhicule lièvre était initialement suivi à vitesse et interdistance constantes et après quelques secondes (3, 4, 5, 6, 7, ou 8 s) il commençait à décélérer ou à accélérer. Dès que les participants répondaient, le véhicule suivi disparaissait de l'écran. Après 1.5 s, le véhicule suivi réapparaissait à l'écran pour un nouvel essai.

2.2 Résultats

Puisque le taux de bonnes réponses est supérieur à 98%, les essais avec erreurs ont été éliminés avant le traitement. D'autre part, la distribution des temps de réponse étant log-normale, nous avons utilisé le logarithme de la médiane des temps de réponses pour les analyses. L'utilisation de la médiane permet, contrairement à la moyenne, de ne pas tenir compte des valeurs aberrantes. Une analyse de variance à mesures répétées $4 \times 2 \times 3 \times 2$

(Contraste x Interdistance x Accélération x Sens du mouvement) a été menée. Les tests post-hoc de Newman-Keuls et le calcul de la taille d'effet relative (η^2 partiel) complètent l'analyse lorsque l'hypothèse H_0 est rejetée.

2.2.1 Effets principaux

L'analyse de variance fait apparaître un effet principal de la condition de contraste ($F(3,33)=32.8$; $p<.0001$; $\eta^2=.749$), correspondant globalement à une augmentation du temps de réponse avec la diminution du contraste (Figure 23). Les tests post-hoc montrent que toutes les conditions diffèrent significativement ($p<.01$), sauf les conditions avec des contrastes de 18.9% et de 89.3% (temps clair) qui ne diffèrent pas ($m=1.67$ s pour le contraste de 0.4% ; $m=1.49$ s pour 5.7% ; $m=1.38$ s pour 22.3% ; et $m=1.40$ s sans brouillard).

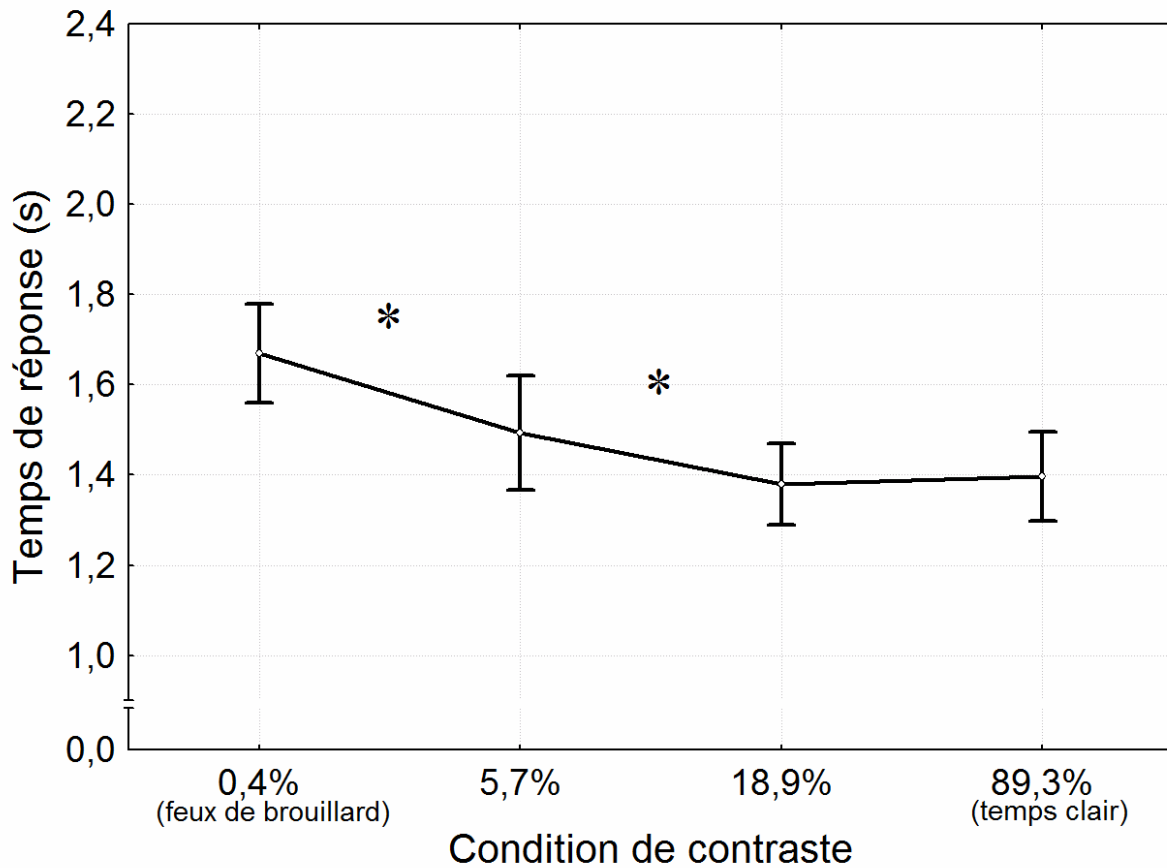


Figure 23 : Temps de réponse en fonction de la condition de contraste. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

L'analyse fait également apparaître un effet principal de la distance intervéhiculaire ($F(1,11)=2073$; $p<.0001$; $\eta^2=.995$) dans le sens d'un temps de réponse plus long à 32 m ($m=1.8$ s) qu'à 16 m ($m=1.16$ s) (Figure 24-gauche). Il y a enfin un effet principal de

l'accélération ($F(2,22)=5528$; $p<.0001$; $\eta^2=.998$) dans le sens d'un temps de réponse plus long lorsque l'accélération est plus faible (Figure 24-droite). Les tests post-hoc montrent que les trois conditions diffèrent ($p<.00025$) (0.7 m/s^2 : 2.4 s ; 3 m/s^2 : 1.18 s ; 7 m/s^2 : 0.87 s).

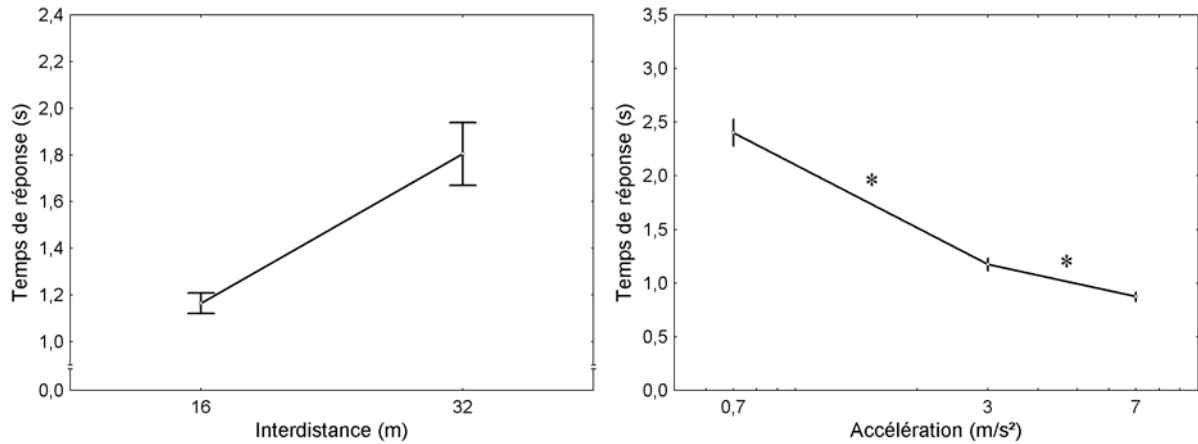


Figure 24 : *Gauche* : Temps de réponse en fonction de l'interdistance. *Droite* : Temps de réponse en fonction de l'accélération. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

2.2.2 Interactions

L'analyse fait apparaître une interaction entre la condition de contraste et la distance intervéhiculaire ($F(3,33)=7.53$; $p<.001$; $\eta^2=.406$), indiquant un effet plus important du contraste pour l'interdistance longue comparé à l'interdistance courte (Figure 25). Pour l'interdistance longue (32 m), le temps de réponse est plus long ($p<.00025$) pour la condition où le véhicule n'est visible que par ses feux ($m=2.04 \text{ s}$) que pour les conditions sans brouillard ($m=1.66 \text{ s}$) et les conditions de brouillard avec des contrastes de 18.9% ($m=1.68 \text{ s}$) et de 5.7% ($m=1.84 \text{ s}$). Le temps de réponse est également plus long ($p<.0001$) lorsque le contraste est de 5.7% que lorsqu'il est de 18.9% et que pour la condition sans brouillard. Seule la différence entre les conditions de contraste de 89.3% et de 18.9% n'est pas significative. Pour la distance courte (16 m), le temps de réponse est plus long ($p<.00025$) pour la condition où le véhicule n'est visible que par ses feux ($m=1.30 \text{ s}$) que pour les conditions sans brouillard ($m=1.13 \text{ s}$) et les conditions de brouillard avec des contrastes de 18.9% ($m=1.08 \text{ s}$) et de 5.7% ($m=1.14 \text{ s}$). Le temps de réponse est également plus long lorsque le contraste est de 5.7% que lorsqu'il est de 18.9% ($p<.001$). Il est à noter que le temps de réponse dans la condition de contraste de 18.9% est significativement plus court ($p<.025$) que celui mesuré dans la condition sans brouillard (contraste de 89.3%), et qu'il n'y a pas de différence significative entre les contrastes de 5.7% et de 89.3%.

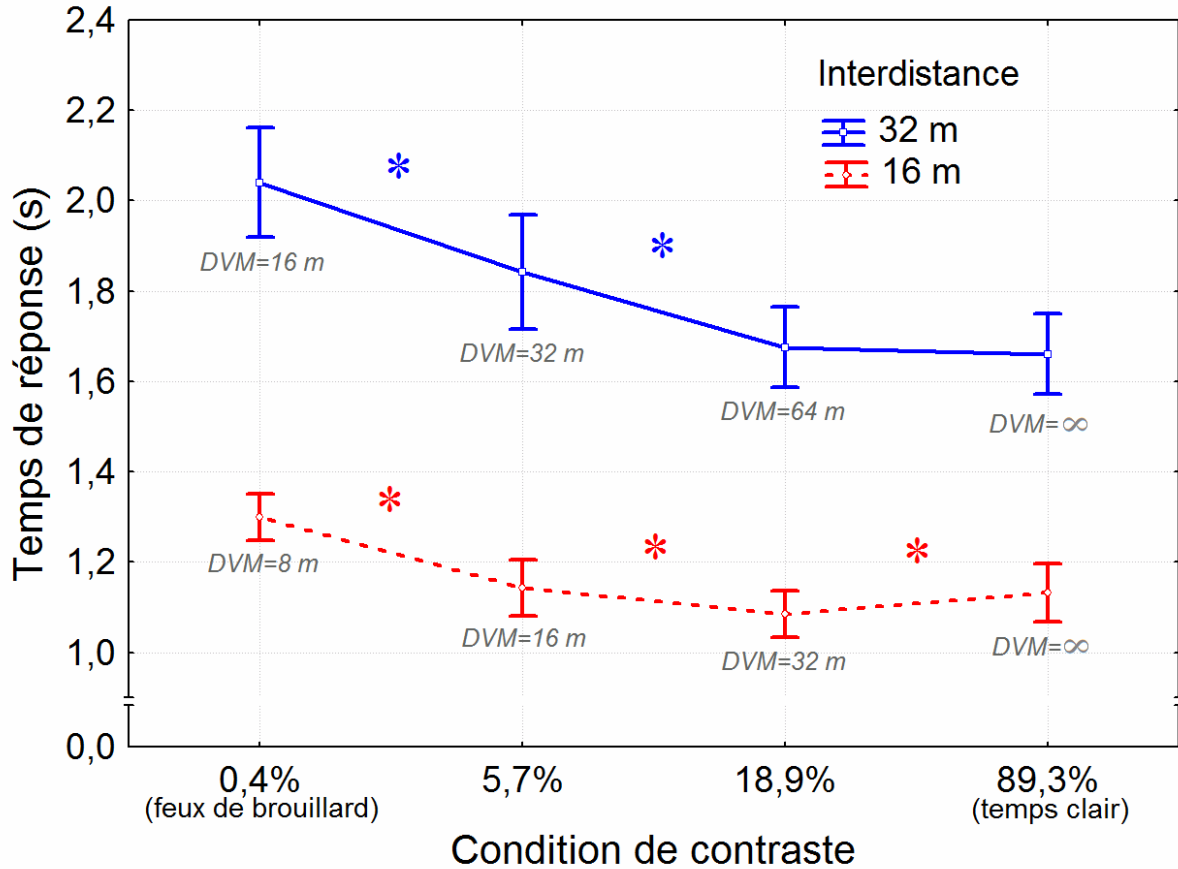


Figure 25 : Temps de réponse en fonction du contraste et de la distance intervéhiculaire. La Distance de Visibilité Météorologique (DVM) a été indiquée en italique pour chaque condition. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls.

L'analyse fait également apparaître une interaction entre la condition de contraste et le sens du mouvement ($F(3,33)=13.33$; $p < .0001$; $\eta^2=.548$) (Figure 26). Il en ressort que l'augmentation du temps de réponse lorsque le contraste diminue est plus importante pour l'éloignement que pour le rapprochement. Le temps de réponse est plus long pour l'éloignement que pour le rapprochement pour le contraste le plus faible ($p < .00025$) alors que l'on constate le contraire par temps clair ($p < .05$).

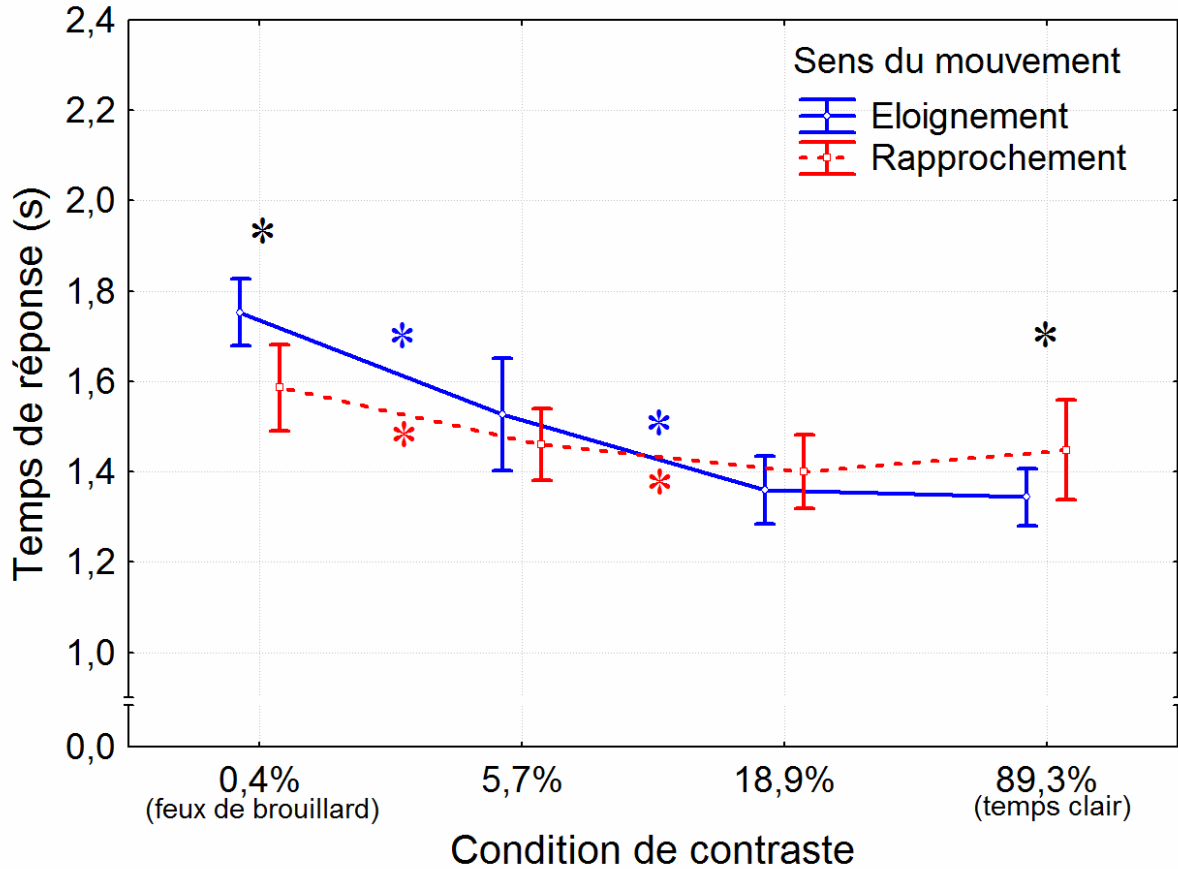


Figure 26 : Temps de réponse en fonction du contraste et du sens du mouvement. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls. Les étoiles sont de couleur noire lorsqu'il s'agit de comparer l'éloignement et le rapprochement.

Il y a également une interaction entre la condition de contraste et l'accélération ($F(6,66)=2.95$; $p < .025$; $\eta^2=.211$), indiquant que l'effet du brouillard sur le temps de réponse est plus important pour les plus grandes accélérations (Figure 27-haut) (mais cette interaction n'apparaît pas lorsque l'analyse des résultats est réalisée sur les temps de réponse bruts, i.e. sans transformation log). La seule différence que les tests post-hoc font apparaître entre les trois accélérations est que le temps de réponse est plus long pour le contraste de 5.7% que par temps clair pour les accélérations de 3 et 7 m/s^2 ($p < .00025$), alors que ce n'est pas le cas pour celle de 0.7 m/s^2 .

Il y a une interaction entre l'accélération et la distance intervéhiculaire ($F(2,22)=61.5$; $p < .0001$; $\eta^2=.848$) dans le sens où l'augmentation du temps de réponse avec la distance est plus importante pour les faibles accélérations (Figure 27-bas-gauche). Les tests post-hoc montrent que toutes les conditions sont différentes ($p < .00025$). Il y a enfin une interaction

entre l'accélération et le sens du mouvement ($F(2,22)=6.16$; $p<.01$; $\eta^2=.359$) (Figure 27-bas-droite). Les tests post-hoc montrent que pour l'accélération la plus importante (7 m/s^2), le temps de réponse est plus long ($p<.005$) pour l'éloignement ($m=-0.058$; $\sigma=0.086$) que pour le rapprochement ($m=-0.077$; $\sigma=0.09$) alors que ce n'est pas le cas pour les deux autres valeurs d'accélération.

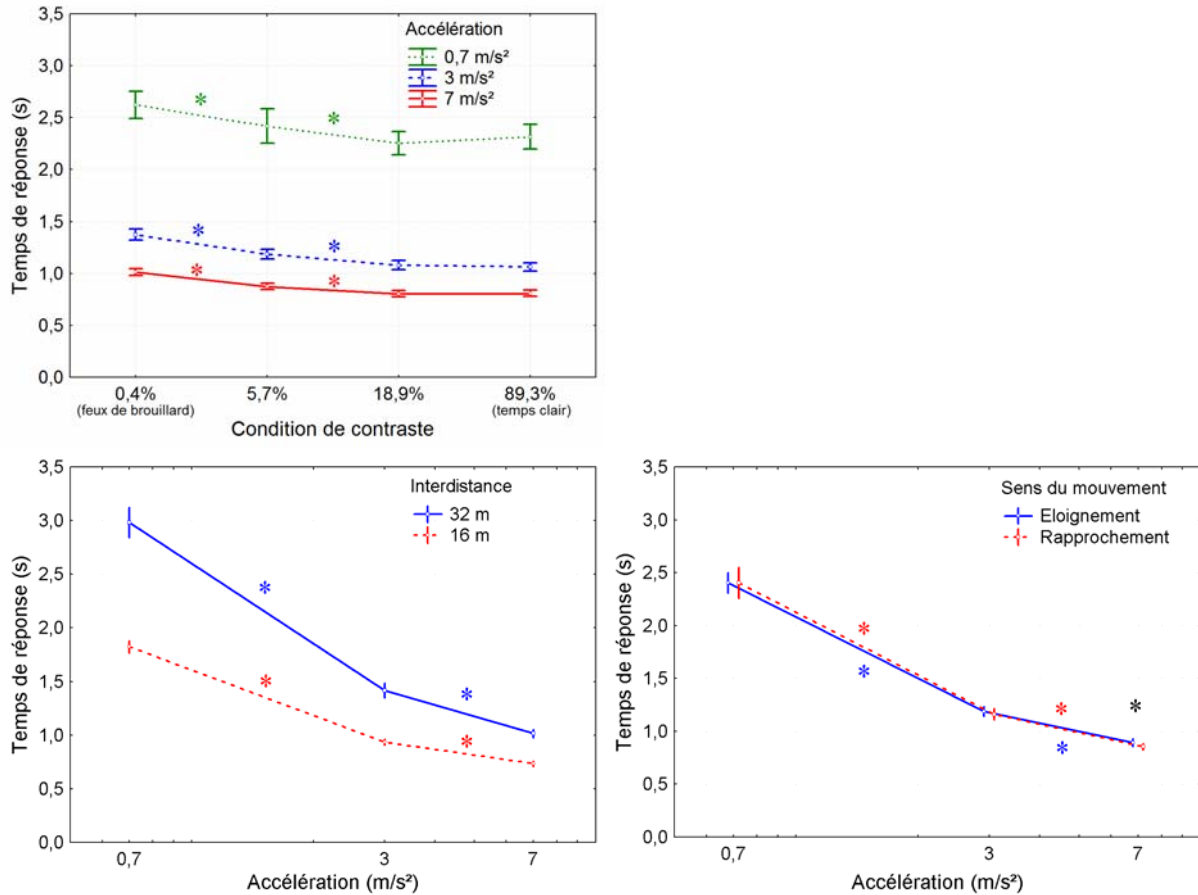


Figure 27 : Haut : Temps de réponse en fonction du contraste et de l'accélération. Bas gauche : Temps de réponse en fonction de l'accélération et de l'interdistance. Bas droite : Temps de réponse en fonction de l'accélération et du sens de mouvement. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

2.2.3 Interactions triples

L'analyse fait apparaître quatre interactions triples. Les résultats des tests post-hoc ne sont pas détaillés mais les différences significatives sont présentées sur les graphiques (Figure 28 à Figure 31). Il y a une interaction entre la condition de contraste, l'accélération, et le sens du mouvement ($F(6,66)=5.16$; $p<.00025$; $\eta^2=.319$). Elle indique que l'augmentation plus importante du temps de réponse pour l'éloignement que pour le rapprochement lorsque le contraste diminue apparaît en particulier pour l'accélération de 0.7 m/s^2 (Figure 28). Il y a une

Chapitre 3 : Perception du mouvement relatif

interaction entre la condition de contraste, la distance intervéhiculaire, et le sens du mouvement ($F(3,33)=8.15$; $p<.0005$; $\eta^2=.426$), indiquant que l'augmentation plus importante du temps de réponse pour l'éloignement que pour le rapprochement lorsque le contraste diminue apparaît différemment à 16 m et à 32 m (Figure 29). Il y a également une interaction entre la condition de contraste, l'accélération, et la distance intervéhiculaire ($F(6,66)=3.57$; $p<.005$; $\eta^2=.245$) (Figure 30), et une interaction entre l'accélération, la distance intervéhiculaire, et le sens du mouvement ($F(2,22)=50.28$; $p<.0001$; $\eta^2=.82$) (Figure 31).

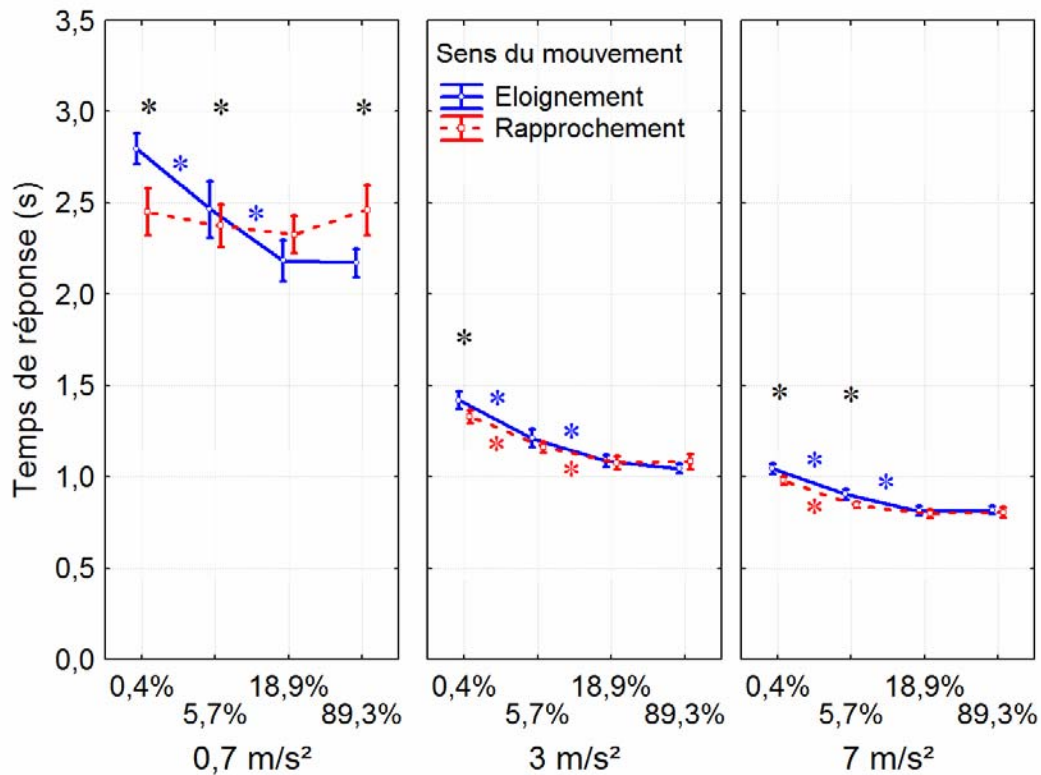


Figure 28 : Temps de réponse en fonction du contraste, du sens du mouvement, et de l'accélération. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls. Les étoiles sont de couleur noire lorsqu'il s'agit de comparer l'éloignement et le rapprochement.

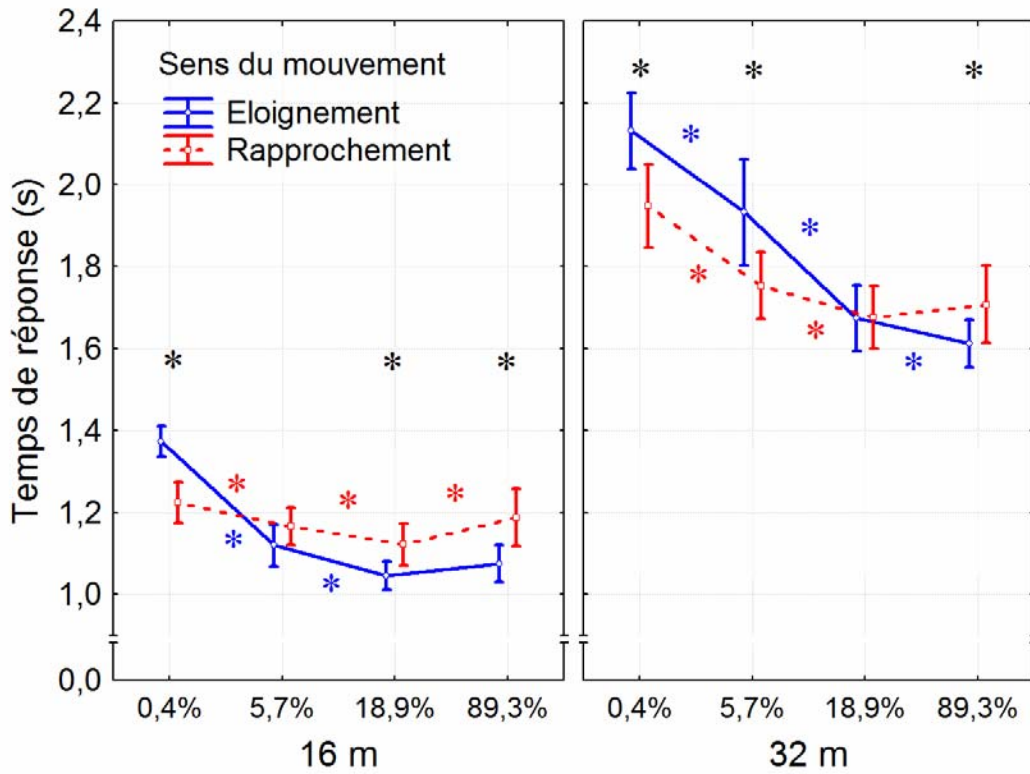
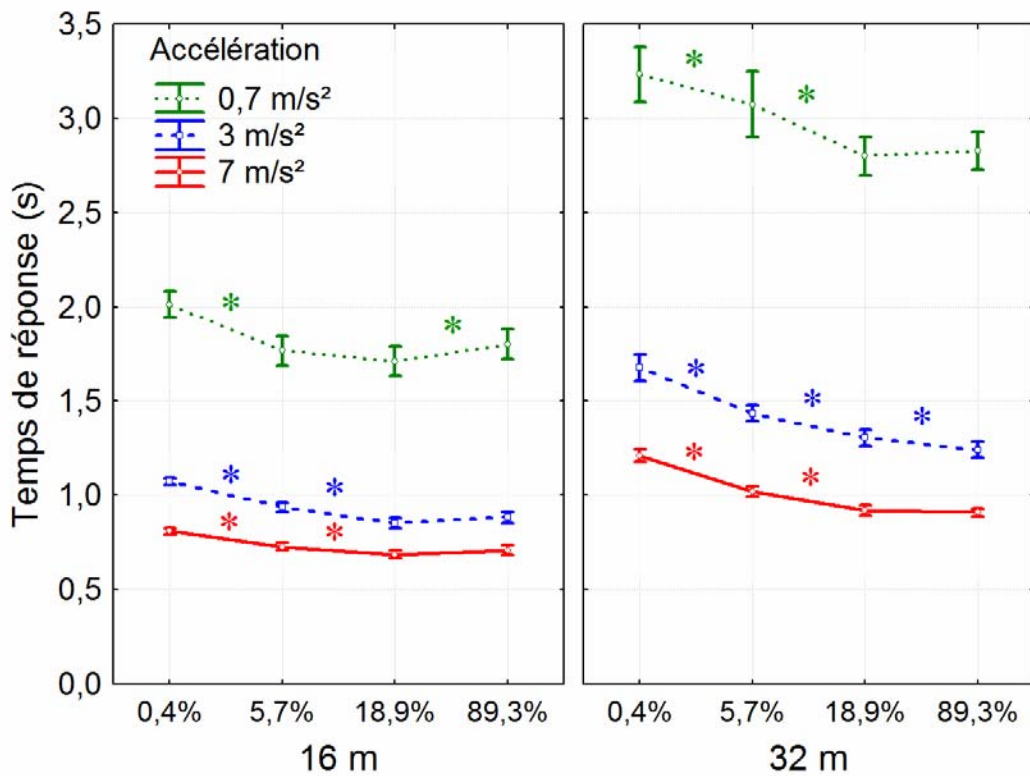


Figure 29 : Temps de réponse en fonction du contraste, de l'interdistance, et du sens du mouvement. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls. Les étoiles sont de couleur noire lorsqu'il s'agit de comparer l'éloignement et le rapprochement.



Chapitre 3 : Perception du mouvement relatif

Figure 30 : Temps de réponse en fonction du contraste, de l'interdistance, et de l'accélération. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls.

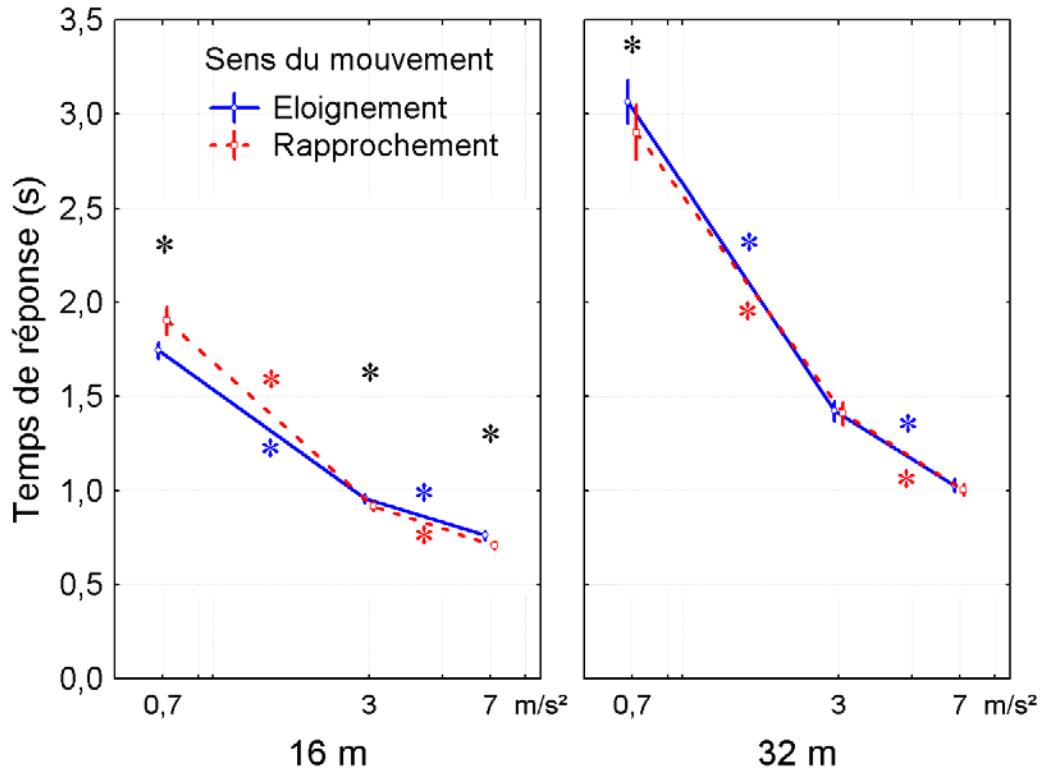


Figure 31 : Temps de réponse en fonction de l'interdistance, du sens du mouvement, et de l'accélération. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls. Les étoiles sont de couleur noire lorsqu'il s'agit de comparer l'éloignement et le rapprochement.

2.2.4 Recherche d'un invariant

Dans cette section, nous cherchons à savoir si des modèles simples peuvent rendre compte des temps de réponse mesurés. La modélisation du seuil de perception du mouvement relatif permettrait d'extrapoler les résultats observés pour d'autres valeurs des variables indépendantes (i.e. contraste, distance, et accélération). L'existence d'un seuil fixe (un invariant) à partir duquel le mouvement serait détecté constituerait un modèle simple. Les variables accélération et interdistance ainsi que leur interaction expliquent 92.3% de la variabilité totale, c'est pourquoi nous avons d'abord cherché à savoir s'il existe un invariant rendant compte de l'influence de ces deux variables. Par ailleurs, le temps de réponse de choix peut être décomposé en quatre parties qui correspondent à quatre étapes de traitement : la détection du stimulus, la discrimination du stimulus, la sélection de la réponse, et enfin

l'exécution motrice (Miller & Low, 2001). Pour modéliser au mieux le seuil de perception, nous avons cherché à isoler le temps nécessaire à la détection et discrimination des stimuli. Pour ce faire, nous avons soustrait le temps de réponse de choix à une tâche simple (qui avait été mesuré pour chaque participant) à tous les temps de réponse de discrimination du sens du mouvement. L'instant de la discrimination du sens du mouvement ainsi calculé, a été utilisé pour les traitements qui suivent.

Comme nous l'avions évoqué, plusieurs auteurs (Duckstein, Unwin, Boyd, 1970 ; Mortimer, 1971) ont constaté sur tout ou partie de leurs résultats que le seuil de détection du mouvement en profondeur pourrait correspondre à un rapport de Weber sur la taille angulaire du véhicule. Nous avons donc calculé le rapport entre la taille angulaire initiale du véhicule et sa taille angulaire au moment de la discrimination du mouvement. La Figure 32-gauche montre que dans notre cas, ce rapport n'est pas le même pour les différentes accélérations et distances. Il varie de 2.5% (à 7 m/s² et 16 m) à 8.4% (à 0.7 m/s² et 32 m). Le rapport de taille angulaire ne peut donc pas être considéré comme un invariant. La différence entre nos résultats et ceux de Duckstein et al. et de Mortimer semble être expliquée par le type de données utilisées. Ils ont en effet calculé le rapport de taille angulaire à l'instant où la réponse des participants est enregistrée, ce qui se rapproche davantage d'un invariant (Figure 32-droite). Notons que les valeurs minimales du rapport de taille angulaire sont discutées dans l'Annexe 5 (page 270), par rapport aux limites du système d'affichage.

Deux autres grandeurs susceptibles d'être perçues et utilisées par les participants sont la vitesse angulaire (Michaels, 1963) et la variable optique τ (Evans & Rothery, 1974). Les deux graphiques de la Figure 33 présentent ces grandeurs au moment de la discrimination du sens du mouvement par les participants. On constate que la vitesse angulaire et la variable optique τ ne constituent pas non plus des invariants.

Chapitre 3 : Perception du mouvement relatif

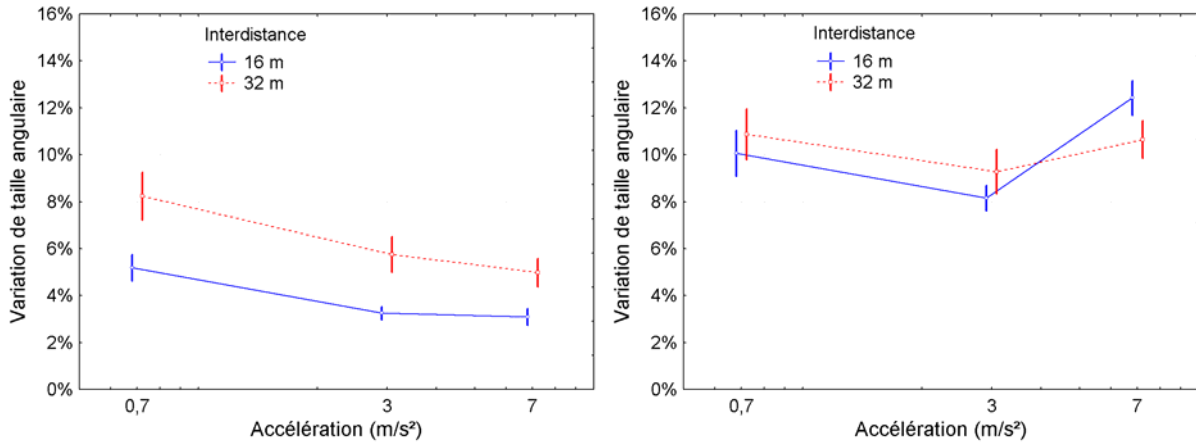


Figure 32 : Gauche : Rapport entre la taille angulaire au moment de la discrimination et la taille angulaire initiale, en fonction de l'accélération et de la distance intervéhiculaire. Ce graphique prend en compte les données des quatre conditions de visibilité et des deux sens de mouvement. Droite : Rapport entre la taille angulaire au moment de la réponse et la taille angulaire initiale, en fonction de l'accélération et de la distance intervéhiculaire. Ce graphique prend uniquement en compte les données correspondant au contraste de 89.3% pour le rapprochement, comme chez Duckstein et al. (1970) et chez Mortimer (1971). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

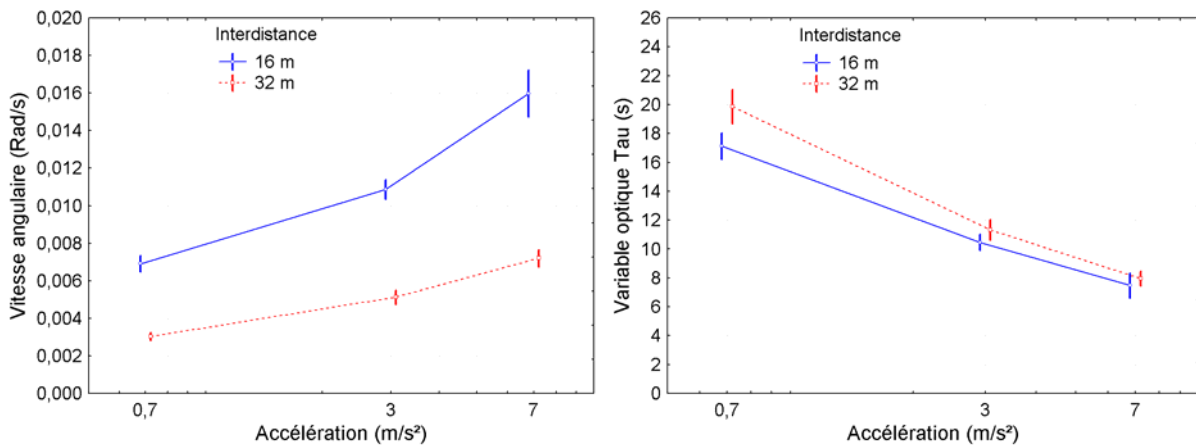


Figure 33 : Gauche : Vitesse angulaire au moment de la discrimination, en fonction de l'accélération et de la distance intervéhiculaire. Droite : Variable optique τ (tau) au moment de la discrimination, en fonction de l'accélération et de la distance intervéhiculaire. Ces graphiques présentent les données correspondant aux quatre conditions de visibilité et aux deux sens de mouvement. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

2.2.5 Calcul de la variation du contraste

En condition de brouillard, le contraste de la silhouette par rapport au fond augmente ou diminue lorsque le véhicule se rapproche ou s'éloigne. On peut alors se demander si cette variation du contraste a pu être utilisée comme information pour percevoir le mouvement

relatif. Pour répondre à cette question, nous avons calculé la variation du contraste en pourcentage de sa valeur initiale, à l'instant de la discrimination du mouvement, i.e. en soustrayant les temps de sélection de la réponse et d'exécution motrice tel que nous l'avons fait précédemment. Pour les conditions où la silhouette est visible, la plus grande variation du contraste apparaît pour le rapprochement avec l'interdistance de 32 m. La variation est respectivement de 10.7% et 26.1% pour les conditions de contraste de 18.9% et 5.7%. Au contraire lorsque le véhicule n'est vu que par ses feux, la plus grande variation du contraste entre les feux et le fond apparaît pour l'éloignement avec l'interdistance de 16 m. La variation du contraste est de 10.4% pour cette condition, sachant que le contraste de luminance entre les feux et le fond est initialement de 33%.

2.3 Discussion concernant les résultats de l'expérimentation 1

2.3.1 Interprétation des résultats en termes perceptifs

Tout d'abord, cette expérience réplique les nombreux résultats antérieurs mettant en évidence des temps de réponse réduits lorsque la distance intervéhiculaire est courte et l'accélération importante (e.g., Boer, 1999b ; Duckstein, Unwin, & Boyd, 1970). Conformément à l'objectif de notre étude, nous discutons ici plus en détail l'influence du brouillard tel que nous l'avons analysé à travers les variables contraste. L'augmentation des seuils de perception avec la diminution de la visibilité (Figure 23) confirme notre hypothèse d'une altération de la sensibilité au mouvement relatif en condition de brouillard. Alors que le seuil de perception du mouvement n'est pas affecté lorsque la silhouette est bien visible (contraste de 18.9%), nous constatons une augmentation significative de ce seuil lorsque le contraste est réduit de façon importante, c'est-à-dire lorsque la silhouette du véhicule est peu visible (contraste de 5.7%). Nos résultats indiquent une augmentation du seuil encore plus importante lorsque la silhouette est totalement masquée (contraste de 0.4%) et lorsque le véhicule n'est visible que par ses feux arrière. Cette augmentation du seuil peut être attribuée à l'écart réduit entre les deux feux qui diminue la taille angulaire du véhicule et ainsi sa vitesse angulaire. Notons que l'augmentation du seuil plus importante pour le contraste de 0.4% que pour le contraste de 5.7% laisse supposer que les informations traitées n'étaient pas les mêmes dans les deux cas. La silhouette du véhicule semble donc avoir été traitée lorsque son contraste par rapport au fond était de 5.7%, et l'augmentation du seuil serait alors liée au faible contraste.

Chapitre 3 : Perception du mouvement relatif

Alors que le brouillard est globalement moins dense pour la longue interdistance (cf. Tableau 4), la réduction du contraste affecte le seuil de perception de façon plus importante pour cette interdistance que pour l'interdistance courte (Figure 25). Ainsi, l'augmentation du seuil dans la condition où seuls les feux sont visibles (contraste de 0.4%) comparée à la condition sans brouillard s'élève à 0.38 s pour la longue interdistance, et à seulement 0.17 s pour la courte interdistance. Lorsque la silhouette est à peine visible (contraste de 5.7%), le brouillard augmente le seuil uniquement pour la longue interdistance, mais pas pour la courte. Lorsque la silhouette reste bien visible en condition de brouillard (contraste de 18.9%), nous constatons même une amélioration significative du seuil pour la courte distance. Ces résultats apparemment paradoxaux sont susceptibles de refléter l'effet du flux optique tel que nous l'avons évoqué précédemment (Boer, 1999b ; Santos et al., 1999). En effet, pour un contraste donné entre la silhouette et le fond, le brouillard est d'autant plus dense que le véhicule est proche (Tableau 4). Le brouillard plus dense aux interdistances courtes réduit la quantité de flux optique concurrentiel, le supprimant notamment au-delà de la distance de visibilité, et améliorant ainsi le seuil de perception.

L'effet du flux optique est susceptible d'expliquer également le fait que le seuil de perception soit plus élevé pour le rapprochement que pour l'éloignement par temps clair, alors que c'est l'inverse pour la condition de brouillard où la silhouette est masquée (Figure 26). En condition de visibilité normale, le flux optique issu de l'environnement interfère avec le flux issu du véhicule lièvre seulement en cas de rapprochement, car les vecteurs vitesse se dirigent dans la même direction. En cas d'éloignement, en revanche, la direction opposée des flux respectifs tend à favoriser la perception du mouvement du véhicule lièvre, d'où l'observation d'un seuil perceptif plus bas pour l'éloignement que pour le rapprochement par temps clair. De plus, cet effet n'est significatif que pour l'accélération la plus faible, i.e. lorsque le flux issu du véhicule lièvre est réduit (Figure 28). L'interaction entre le flux global et le flux local, qui apparaît en particulier pour l'accélération la plus faible, est cohérente avec les résultats de Santos et al. (2000, 2002). On notera de plus, que d'autres auteurs ont également observé une influence du flux global sur la perception du flux local lorsqu'il s'agissait d'effectuer des jugements temporels (Berthelon, & Mestre, 1993 ; Gray, Macuga, & Regan, 2004).

Cette interaction entre le flux optique global et le flux optique issu du véhicule lièvre est atténuée, voire supprimée, en condition de brouillard. La différence de seuil qui apparaît entre le rapprochement et l'éloignement lorsque le contraste est faible (Figure 26) peut alors être

attribuée à la vitesse angulaire du véhicule lièvre, qui est plus grande en cas de rapprochement que d'éloignement. Nous avons en effet évoquée, à travers les travaux de Janssen et al. (1976), le seuil de discrimination d'autant plus bas que la vitesse angulaire est élevée. Nous reviendrons plus loin sur cet aspect, à propos de l'écartement entre les deux feux de brouillard du véhicule lièvre. L'ensemble des éléments qui viennent d'être évoqués, conduit à un phénomène de compensation, avec par temps clair, l'interaction entre le flux optique global et le flux optique local favorisant la perception de l'éloignement, et en condition de brouillard dense, la vitesse angulaire plus grande pour le rapprochement favorisant la perception du rapprochement. La conséquence de ce phénomène de compensation est un inversement de situation entre les contrastes les plus faibles (0.4%) où le seuil de perception est plus bas pour le rapprochement que pour le rapprochement et les contrastes les plus forts (89.3%) où le seuil est au contraire plus bas pour l'éloignement.

On peut par ailleurs s'attendre, comme le suggèrent Santos et al. (2000, 2002), à ce que ce soit le flux optique global visuellement proche du véhicule qui influence la perception du flux local issu du véhicule. Or, la plus grande taille angulaire du véhicule pour l'interdistance courte conduit à ce que les vecteurs vitesse du flux optique environnemental dans une zone proche du véhicule soient plus grands pour l'interdistance courte que pour l'interdistance longue. Cette aspect géométrique du flux optique semble expliquer l'interaction entre la condition de contraste, l'interdistance, et le sens du mouvement (Figure 29). Cela explique en effet que le seuil soit plus bas pour l'éloignement que pour le rapprochement lorsque le contraste est de 18.9% à 16 m alors que ce n'est pas le cas à 32 m. Cet aspect géométrique explique également, à travers le phénomène de compensation, que le seuil soit plus élevé pour l'éloignement que pour le rapprochement lorsque le contraste est de 5.7% à 32 m alors que ce n'est pas le cas à 16 m. Nous ne détaillerons pas davantage l'analyse des interactions triples dans la mesure où la majorité des différences significatives résultent des phénomènes présentés ci-dessus.

Les résultats de cette expérience mettent en avant la multiplicité des informations qui ont été traitées pour discriminer le sens du mouvement relatif. Il y a les informations liées à la silhouette ou aux feux du véhicule, ainsi que les informations liées à l'environnement qui interagissent avec celles du véhicule. Nous avons par ailleurs cherché à savoir si la variation du contraste entre le véhicule (silhouette ou feux) et le fond en condition de brouillard est susceptible d'être utilisée. Nous avons ainsi calculé la variation du contraste entre la situation

initiale et l'instant où les participants discriminaient le sens du mouvement. Cette variation était au maximum de 10.7, 26.1, et 10.4% pour les conditions de contraste de 18.9, 5.7, et 0.4% respectivement. Les travaux de Adini, Wilkonsky, Haspel, Tsodyks, & Sagi (2004) et de Yu, Klein, et Levi (2004) montrent que le seuil de discrimination du contraste est de l'ordre de 100% du contraste initial lorsque celui-ci est de 5% et de 25 à 40% du contraste initial lorsque celui-ci est de 25% ou 30%. Les seuils mesurés par Adini, et al. et par Yu et al. sont nettement supérieurs aux variations de contraste calculées sur les données de notre expérience. Ce constat nous amène à penser que la variation du contraste n'a probablement pas été une information utilisable lors de notre expérience. Par ailleurs, nous avons cherché à savoir si le seuil mesuré peut être modélisé par un invariant, mais cette recherche n'a pas été concluante. Une explication possible à l'absence d'invariant serait l'existence de plusieurs mécanismes se basant sur des informations différentes. Il est par exemple possible que le mouvement relatif ait été détecté par l'un ou l'autre des deux mécanismes présentés par Seiffert et Cavanagh (1998, 1999), i.e. celui sensible à la vitesse ou celui sensible au changement de position, selon la vitesse angulaire du véhicule lièvre (qui est liée à l'accélération et à l'interdistance).

2.3.2 Implications sur la régulation de l'intervalle

Cette augmentation importante du seuil de perception de l'éloignement par temps de brouillard pourrait contribuer à rendre le suivi de véhicule plus difficile par temps de brouillard. Ainsi, le véhicule lièvre risque d'être perdu de vue non seulement à cause d'une distance de visibilité réduite, mais également à cause d'une détection plus tardive de son éloignement. Le conducteur pourrait alors être amené à suivre le véhicule lièvre de plus près que la distance de visibilité de ses feux arrière, afin de garder une marge pour la détection des accélérations. Les données de trafic de White et Jeffery (1980) montrent en effet que de nombreux conducteurs suivent plus près que nécessaire pour garder les feux arrière du véhicule suivi en vue.

D'une façon plus générale, la réduction de l'interdistance pourrait être un moyen pour le conducteur de compenser la diminution de la sensibilité au mouvement relatif en condition de brouillard et de maintenir un seuil de perception à une valeur proche du seuil habituel rencontré par temps clair. Comme nous l'avons vu auparavant, la sensibilité au mouvement relatif est plus grande quand l'interdistance est plus petite. Cet effet, indépendant des conditions de contraste, est simplement dû à l'augmentation de la taille et de la vitesse angulaire du véhicule lièvre suite à une diminution de l'interdistance.

A cet effet géométrique s'ajoute un effet de contraste en condition de brouillard. Pour une densité de brouillard donnée, le contraste du véhicule suivi augmente avec le rapprochement, permettant en plus de réduire les effets du brouillard sur le seuil de perception. Du fait de ce double effet, nous constatons que le bénéfice d'une réduction d'interdistance, est plus important par temps de brouillard que par temps clair. Nous avons calculé le gain sur le temps de réponse qui serait associé à une réduction de l'intervalle de 32 à 16 m, pour une densité de brouillard donnée (Figure 34). Le gain est en effet de 0.9 s pour le brouillard le plus dense, de 0.75 s pour le brouillard un peu moins dense, et seulement de 0.53 s par temps clair. Un tel gain de temps confirme l'intérêt que les conducteurs pourraient avoir à adopter un intervalle plus court par temps de brouillard que par temps clair.

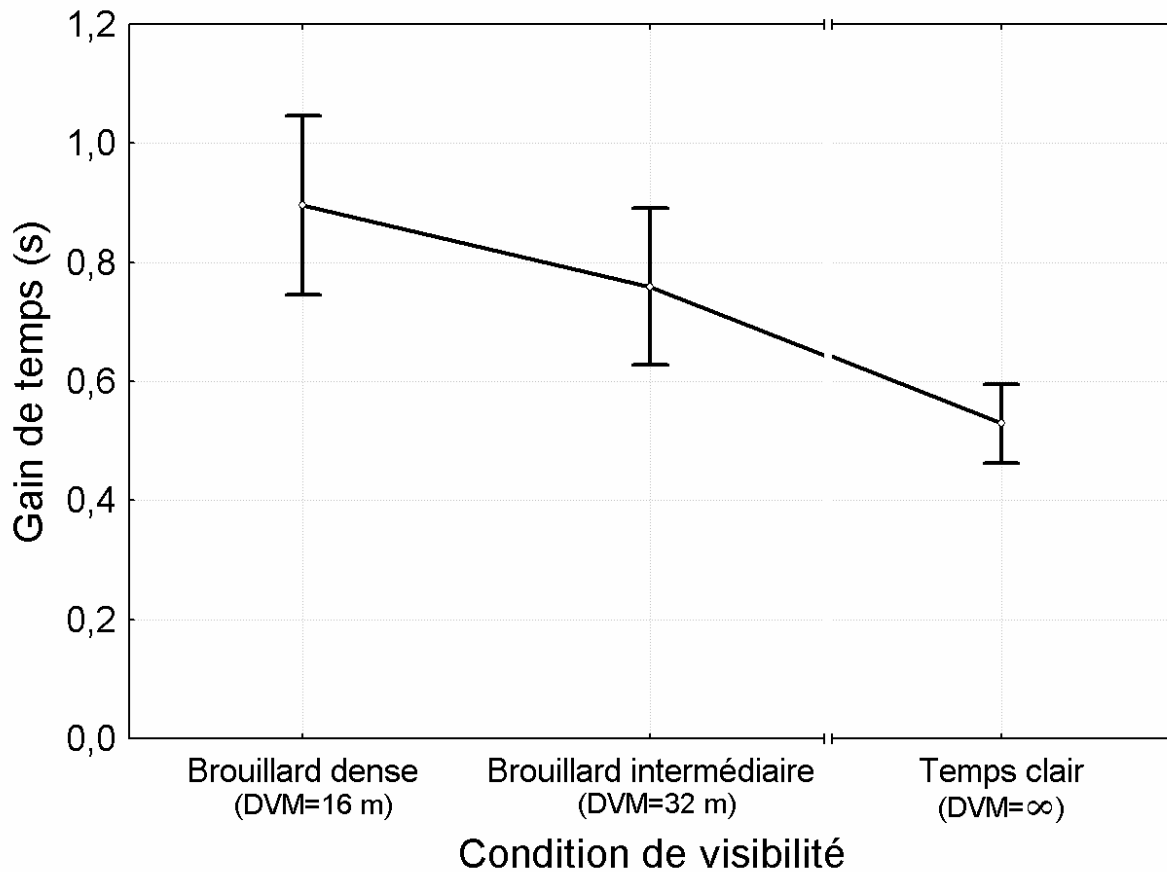


Figure 34 : Gain de temps de réponse associé à une diminution de l'intervalle de 32 m à 16 m en fonction de la Distance de Visibilité Météorologique (DVM). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

3 Expérimentation 2

Les résultats de l'expérimentation 1 suggèrent qu'une réduction donnée de l'intervalle est associée à un gain de temps de détection du mouvement relatif qui est plus important par temps de brouillard que par temps clair. Pour savoir si ce gain plus important par temps de brouillard est observé dans une plus large gamme de distances, nous avons réalisé une seconde expérience en utilisant un plus grand nombre de distances intervéhiculaires avec une même densité de brouillard. Ces conditions expérimentales permettent ainsi une meilleure correspondance avec les situations de conduite réelle.

3.1 Méthode

L'expérience a été réalisée avec un second groupe de participants comprenant quatre hommes et deux femmes, ayant entre 24 et 40 ans. La méthode est la même que pour l'expérience 1, excepté pour les conditions expérimentales : six distances intervéhiculaires ont été utilisées, et seulement une densité de brouillard ($DVM = 32$ m) et une valeur d'accélération (1.5 m/s^2). Cette valeur d'accélération correspond à la fourchette supérieure des accélérations couramment observées en situation de suivi de véhicule (Kuje, Yamamura, Boer, & Manser, 2006).

L'expérience comporte 24 conditions expérimentales correspondant à la combinaison de deux conditions de visibilité, six interdistances, et deux sens de mouvement. Chaque condition expérimentale a été répétée six fois, ce qui donne 144 essais expérimentaux. La condition de visibilité comportait deux modalités : une condition sans brouillard et une condition de brouillard. L'utilisation d'une seule densité de brouillard conduit comme en situation réelle à faire varier le contraste entre le véhicule et le fond avec la distance intervéhiculaire sans affecter la visibilité de l'environnement. Nous avons utilisé six distances intervéhiculaires suivant une progression géométrique de raison $\sqrt{2}$: 11.3, 16, 22.6, 32, 45.3, et 64 m, correspondant à des temps intervéhiculaires compris entre 0.81 et 4.61 s. Les contrastes entre le véhicule et le fond correspondant à ces distances sont respectivement de 28.3%, 18.9%, 11.3%, 5.7%, 1.9%, et 0.4% (silhouette non visible pour cette dernière valeur). Pendant la passation qui se faisait en une seule session, la moitié des participants a commencé par la condition de temps clair alors que l'autre moitié a commencé par la condition de brouillard.

3.2 Résultats

Les données ont été analysées de la même façon que pour l'expérience 1. Une analyse de variance à mesures répétées 2 x 6 x 2 (Visibilité x Interdistance x Sens du mouvement) a été menée. Les tests post-hoc de Newman-Keuls et le calcul de la taille d'effet relative (η^2 partiel) complètent l'analyse.

L'analyse fait apparaître un effet principal de la distance ($F(5,25)=549$; $p<.0001$; $\eta^2=.991$) dans le sens d'un temps de réponse plus long pour les grandes distances. Les tests post-hoc montrent que toutes les conditions diffèrent significativement ($p<.00025$). Il n'y a pas d'effet principal de la condition de visibilité, mais une interaction entre la condition de visibilité et la distance ($F(5,25)=4.84$; $p<.005$; $\eta^2=.492$) (Figure 36). Les tests post-hoc montrent ($p<.0025$) que le temps de réponse est plus long pour la condition de brouillard que pour la condition sans brouillard pour les trois plus grandes distances. La différence est respectivement de 0.41, 0.39, et 0.37 s pour les distances de 32, 45.3, et 64 m.

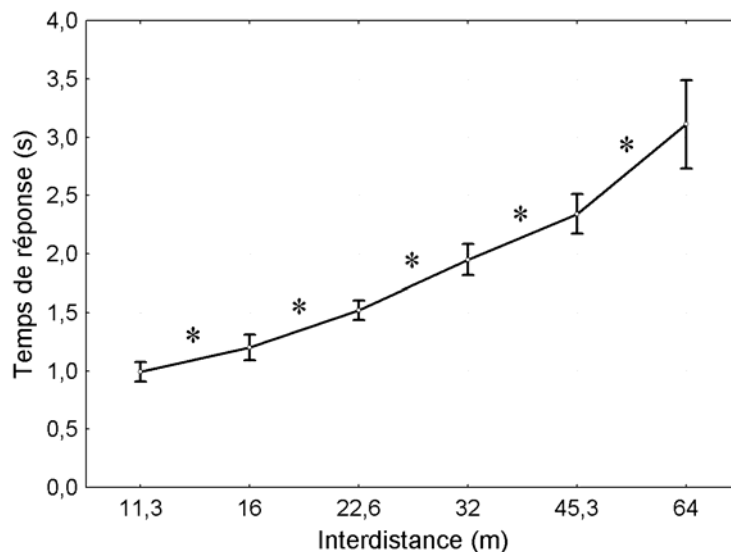


Figure 35 : Temps de réponse en fonction de l'interdistance. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

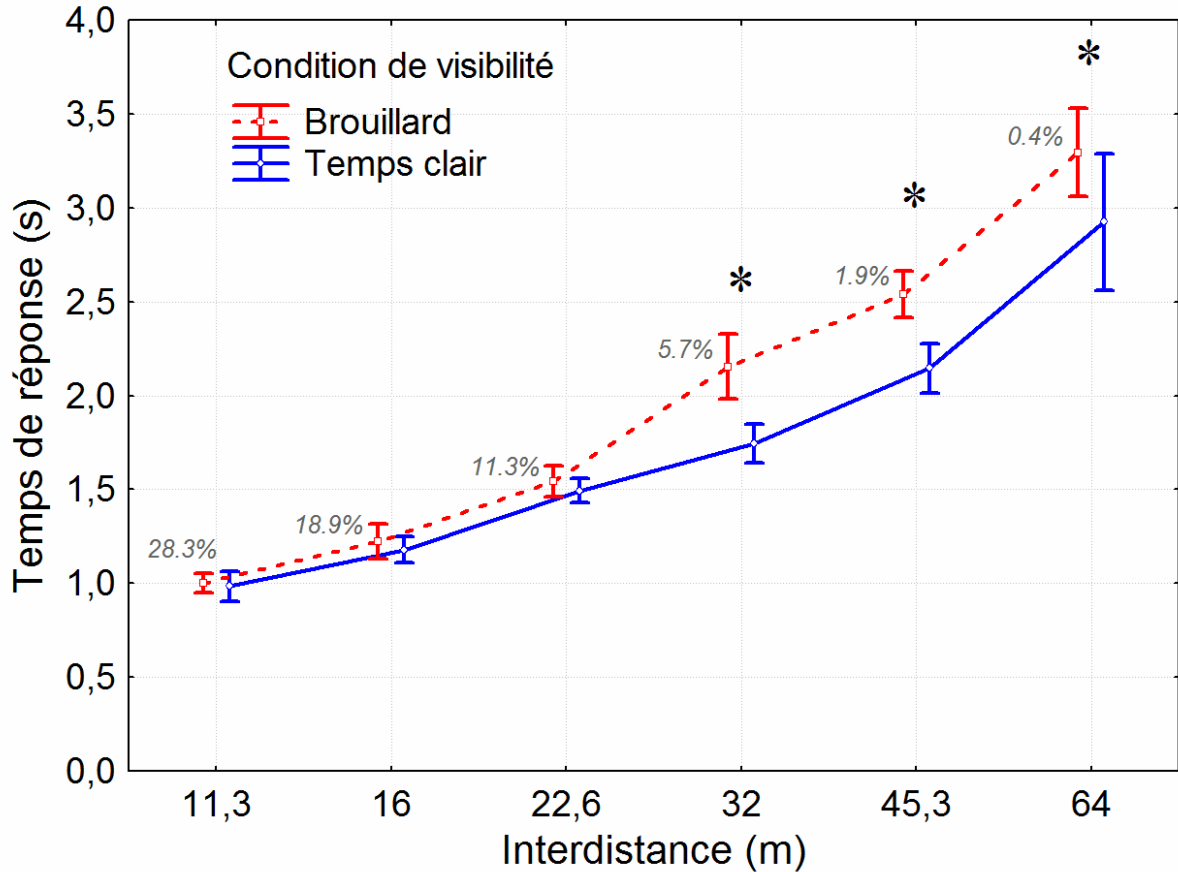


Figure 36 : Temps de réponse en fonction de l'interdistance et de la condition de visibilité. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls.

Il y a une interaction entre la condition de visibilité et le sens du mouvement ($F(1,5)=10.8$; $p < .025$; $\eta^2=.684$), dans le sens où le temps de réponse est plus long pour l'éloignement que pour le rapprochement par temps de brouillard ($p < .025$) alors qu'ils ne diffèrent pas par temps clair. Il y a enfin une interaction entre la distance et le sens du mouvement ($F(5,25)=2.72$; $p < .05$; $\eta^2=.352$), dans le sens où le temps de réponse est plus long pour l'éloignement que pour le rapprochement pour la plus grande distance ($p < .0025$) alors qu'ils ne diffèrent pas pour les autres distances.

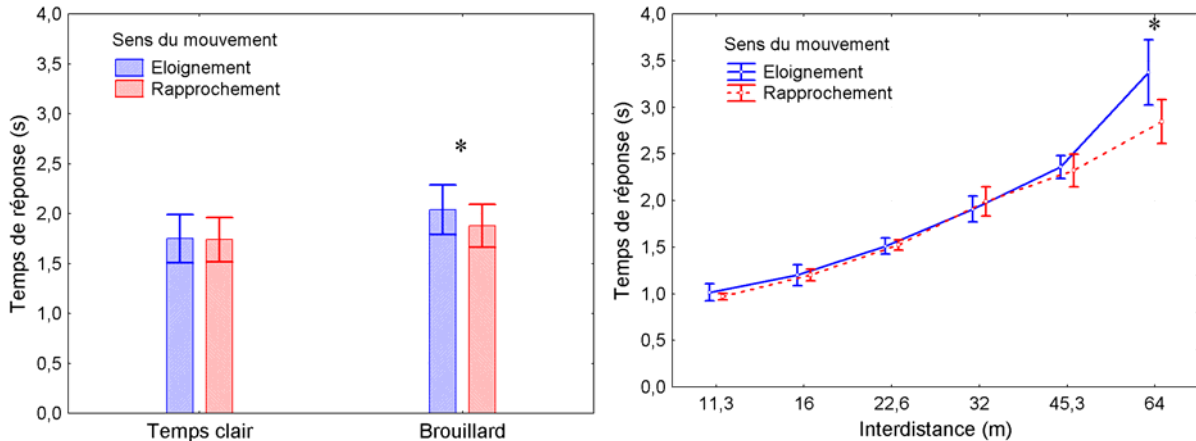


Figure 37 : Gauche : Temps de réponse en fonction de la condition de visibilité et du sens du mouvement. Droite : Temps de réponse en fonction de l'interdistance et du sens du mouvement. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls.

3.3 Discussion concernant les résultats de l'expérimentation 2

Dans cette expérience nous avons étudié les seuils de perception du mouvement relatif pour une même condition de visibilité, mais en fonction de différentes distances intervéhiculaires. Rappelons qu'en condition de brouillard, l'interdistance est un facteur important de variation du contraste entre la silhouette du véhicule et le fond.

3.3.1 *Interprétation des résultats*

Nos résultats indiquent que le brouillard produit une augmentation assez nette des seuils de 0.4 s environ pour les plus grandes interdistances lorsque le contraste descend à des valeurs inférieures ou égales à 5.7%. En revanche, et bien que le brouillard soit dense, son influence reste négligeable pour les courtes interdistances pour lesquelles nous observons des seuils comparables à ceux constatés en condition de visibilité normale. Ainsi, la sensibilité au mouvement relatif ne semble pas être affectée par une large variation du contraste, allant de 89.3% par temps clair jusqu'à 11.3% en condition de brouillard. Ces résultats peuvent être rapprochés de ceux de Edwards, Badcock, et Nishida (1996) qui observent une dégradation de la perception du mouvement lorsque le contraste devient inférieur à une valeur seuil de 15%, alors qu'un phénomène de saturation apparaît lorsque le contraste est au-dessus de cette valeur.

Chapitre 3 : Perception du mouvement relatif

Ces résultats suggèrent que la perception du mouvement relatif se base sur la silhouette du véhicule aussi longtemps que celle-ci reste suffisamment visible. Ainsi, pour les courtes interdistances, et pour une large gamme de contrastes, le brouillard ne détériore pas la sensibilité au mouvement relatif comparé aux conditions de visibilité normale. L'augmentation du temps de réponse pour le contraste de 5.7% (à 32 m) semble être l'effet du contraste proprement dit, comme cela avait été observé dans l'expérience 1. En revanche, avec l'augmentation de l'interdistance et la diminution du contraste, la silhouette devient moins visible (à 45.3 m) et les feux arrière deviennent plus saillants que la silhouette (la masquant partiellement). La silhouette n'est finalement plus visible du tout (à 64 m), et les feux arrière restent la seule source d'information disponible. L'augmentation du seuil en condition de brouillard pour les deux plus grandes interdistances (i.e. pour les deux contrastes les plus faibles) semble donc correspondre à l'adoption d'une méthode visuelle basée sur l'analyse du mouvement des feux. L'augmentation du temps de réponse avec le brouillard serait donc due au faible contraste de la silhouette lorsqu'elle est encore visible et à l'écartement réduit entre les feux lorsque la silhouette n'est plus suffisamment visible.

Comme nous l'avions évoqué, le seuil de perception plus élevé lorsque la méthode visuelle est basée sur l'analyse du mouvement des feux pourrait être dû à l'écartement réduit entre les feux de brouillard comparé à la taille angulaire du véhicule. Janssen, Michon, et Harvey (1976) montrent qu'en condition de nuit, l'écartement entre les deux feux est la principale information utilisée pour la détection du mouvement relatif. Les résultats de leurs expérimentations montrent d'autre part que si l'écartement entre les deux feux est multiplié par un facteur k , alors la vitesse relative nécessaire pour percevoir le mouvement est multipliée par $k-0.25$. Pour savoir si l'augmentation du temps de réponse avec le brouillard peut être entièrement expliquée par l'écartement réduit entre les feux de brouillard, nous avons par le calcul, fait comme si l'écartement des feux correspondait à la largeur totale du véhicule en utilisant la formule de Janssen et al. Dans notre cas, le rapport entre l'écartement des feux et la largeur du véhicule est de 0.67. La vitesse relative permettant la perception du mouvement devrait donc être multipliée par $0.67-0.25 = 1.11$ lorsque le véhicule n'est perçu que par ses feux, par rapport à une situation où la silhouette est nettement visible. On suppose ici que la taille angulaire du véhicule est la principale information utilisée lorsque sa silhouette est visible. Pour tester cette hypothèse en nous basant sur les résultats de Janssen et al., nous avons calculé la vitesse relative à l'instant où les participants ont répondu, bien que la vitesse relative ne soit pas une information directement utilisable par les participants. Nous avons

ensuite appliqué un correctif sur ces données en divisant la vitesse relative par 1.11 pour les conditions de brouillard où l'interdistance était d'au moins 32 m (Figure 38). Les données obtenues après application du correctif correspondent au seuil théorique de vitesse relative si l'écartement des feux correspondait à la largeur du véhicule. Une analyse de variance 2 x 6 x 2 (Visibilité x Interdistance x Sens du mouvement) a ensuite été menée sur ces données corrigées. Les résultats de l'analyse font apparaître différents effets, mais pas d'interaction entre la condition de visibilité et l'interdistance. On peut donc considérer que pour cette expérience, le faible écartement entre les feux de brouillard peut entièrement expliquer le seuil de perception plus élevé lorsque la silhouette du véhicule n'est pas suffisamment visible (i.e. pour les contrastes de 1.9 et 0.4%).

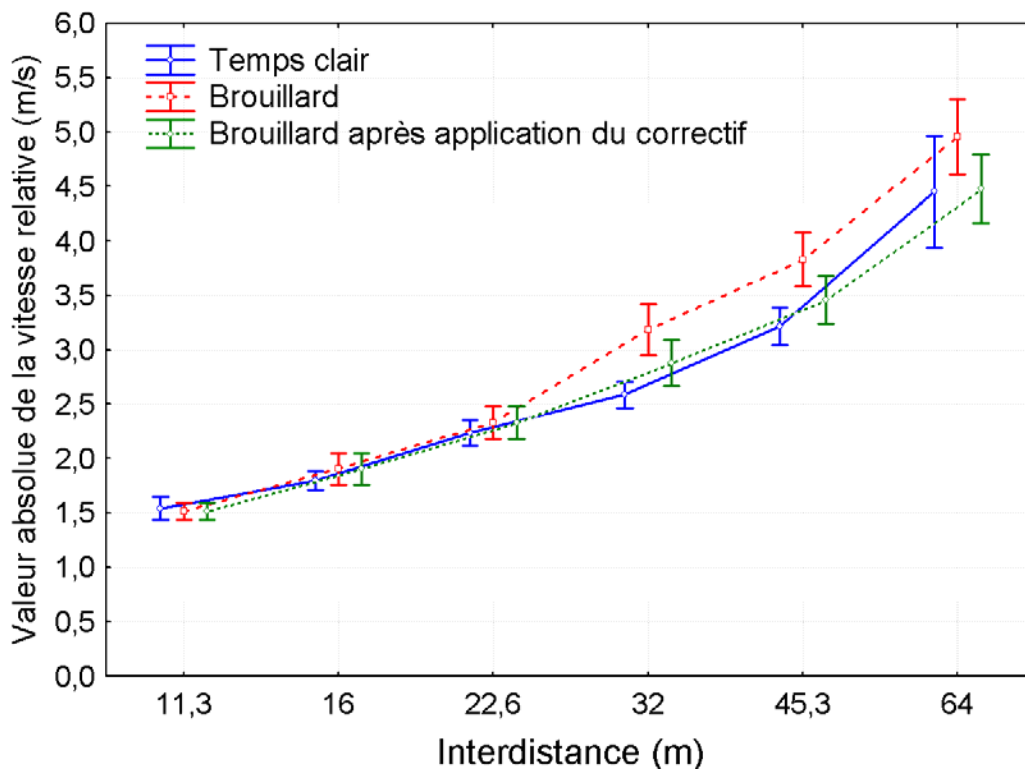


Figure 38 : Valeur absolue de la vitesse relative en fonction de la condition de visibilité et de l'interdistance. La courbe verte (pointillés) correspond aux données de la condition de brouillard auxquelles a été appliqué un correctif pour les trois plus grandes distances. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

Bien que l'augmentation du seuil pour le contraste de 5.7% puisse être entièrement expliquée par l'écartement réduit entre les feux de brouillard, nous avons vu lors de l'expérience 1, que cette augmentation du seuil est probablement liée au faible contraste du véhicule lièvre. Nous supposons donc, comme cela a déjà été mentionné, que l'augmentation du seuil pour le contraste de 5.7% est l'effet du contraste proprement dit. On notera par

ailleurs que pour la première expérimentation, l'écartement des feux étudié à travers ce calcul, n'explique par entièrement l'augmentation du seuil pour le contraste le plus faible.

Concernant les effets liés au sens du mouvement (Figure 37), nous supposons comme précédemment l'existence de deux phénomènes. Il y a d'une part un effet géométrique lié à la vitesse angulaire plus grande pour le rapprochement que pour l'éloignement qui favorise la perception du rapprochement. Il y a d'autre part l'interaction entre le flux optique global et le flux optique issu du véhicule lièvre. Rappelons que pour la première expérience, les effets de l'interférence ne sont significatifs que pour l'accélération la plus faible (0.7 m/s^2). Nous supposons donc qu'avec l'accélération utilisée pour cette seconde expérience (1.5 m/s^2), le flux optique issu du véhicule lièvre est suffisant pour limiter la portée de l'interaction. Le déséquilibre entre ces deux phénomènes conduit à ce que par temps clair, l'interférence entre les flux optiques compense la plus grande vitesse angulaire pour le rapprochement, mais sans inverser la tendance, ce qui conduit à des seuils équivalents pour les deux sens de mouvement. Au contraire en condition de brouillard, l'interférence entre les flux optiques est moindre, conduisant à favoriser la perception du rapprochement (Figure 37-gauche). La perception du rapprochement est favorisée en condition de brouillard en particulier pour la plus grande distance où l'environnement est totalement masqué à proximité du véhicule lièvre, ce qui supprime l'interférence entre les flux optiques (Figure 37-droite). En ce qui concerne la condition de visibilité normale, il est envisageable que le flux optique issu de la texture de la route ne soit pas restitué correctement au-delà d'une certaine distance (problème de résolution spatio-temporelle) conduisant également à favoriser la perception du rapprochement pour la plus grande distance.

3.3.2 Calcul du gain de temps de réponse associé à une réduction de l'intervalle

Ces résultats suggèrent que la réduction de l'interdistance par temps de brouillard pourrait être un moyen pour les conducteurs de compenser l'augmentation du seuil de perception. Un gain en temps de réponse peut être attendu lorsque l'intervalle de suivi initial est supérieur à la distance qui assure une bonne visibilité de la silhouette (i.e. avec un contraste inférieur à 5%). Ce gain est particulièrement important lorsque le rapprochement permet au conducteur de passer d'un traitement des feux arrière au traitement de la silhouette. Nous avons calculé le gain de temps de réponse en cas de rapprochement pour différentes interdistances initiales en condition de brouillard et de visibilité normale (Figure 39). Il apparaît clairement que le gain est plus important en condition de brouillard que par temps clair uniquement lors d'une

réduction de l'interdistance de 32 à 22.6 m. Cette gamme assez réduite d'interdistances correspond dans notre expérience précisément à la transition entre les conditions de mauvaise et de bonne visibilité de la silhouette du véhicule lièvre.

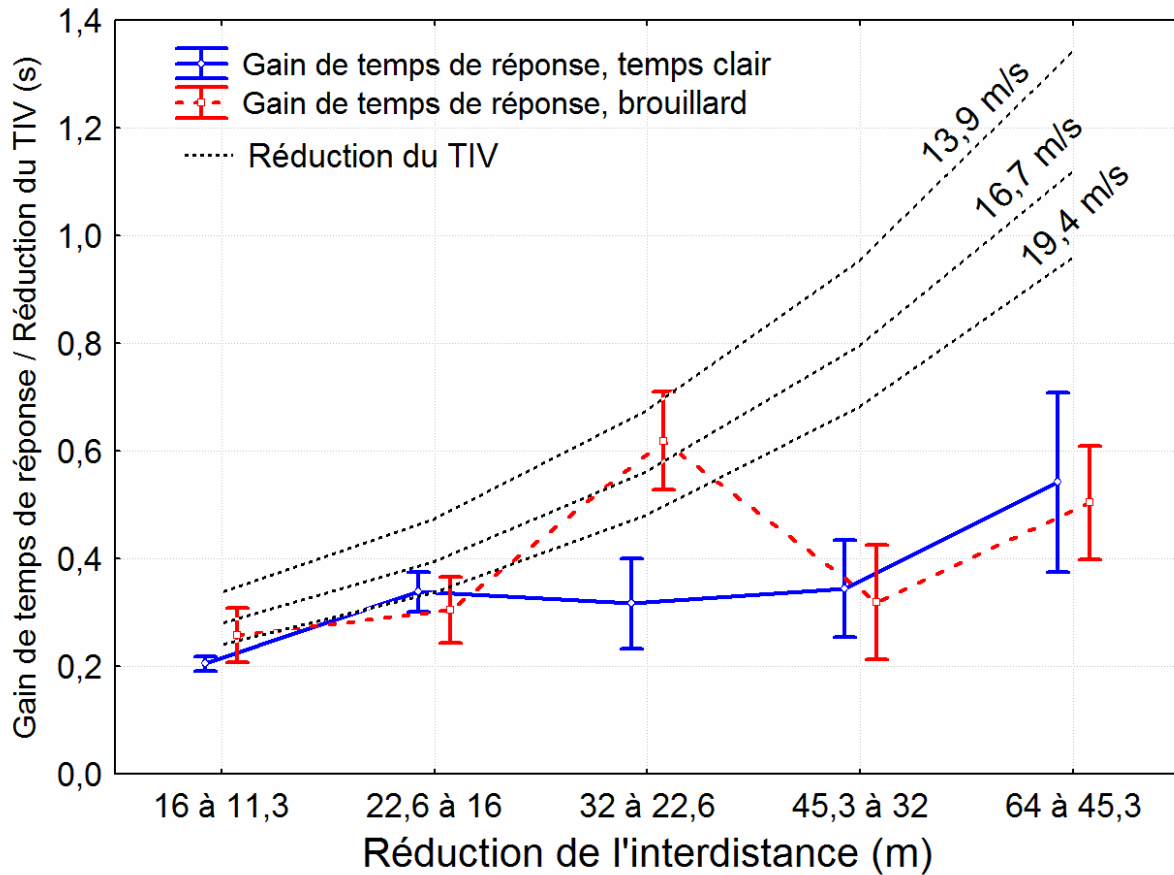


Figure 39 : Gain de temps de réponse en fonction des conditions de visibilité et de la réduction de l'interdistance. Seuls les temps de réponse correspondant au rapprochement ont été pris en compte. Les courbes en pointillés représentent la réduction du TIV correspondant à cette réduction de l'interdistance pour des vitesses de 13.9, 16.7, et 19.4 m/s (50, 60 et 70 km/h). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

À partir de ces résultats, on peut se demander si la réduction du temps de réponse peut dans certaines conditions compenser l'augmentation du risque qui est associée à la réduction du TIV. Pour ce faire, il a fallu définir un indicateur permettant de quantifier le niveau de risque d'une situation de suivi de véhicule, dans le cas où le véhicule lièvre décélérerait. Il existe cependant de nombreux scénarii possibles qui dépendent des différentes variables impliquées : interdistance et vitesse, décélération de chacun des deux véhicules, durée de la décélération du véhicule lièvre, et temps de réaction du véhicule suiveur. La survenue d'une collision et la gravité de cette collision dépend de l'ensemble de ces paramètres, ce qui rend complexe l'étude de toutes les possibilités. Nous avons donc choisi un scénario qui nous

semble pertinent : nous considérons une situation de suivi de véhicule à une vitesse V_0 et avec un intervalle TIV. Nous supposons alors que le véhicule lièvre décélère avec une décélération constante γ jusqu'à l'arrêt complet sans que le véhicule suiveur ne l'ait anticipé. Après un temps de réaction TR , le véhicule suiveur ralentit avec la même décélération γ jusqu'à l'arrêt complet. Dans cette situation, l'interdistance lorsque les deux véhicules sont à l'arrêt est donnée par : $d_a = V_0 \cdot (TIV - TR)$. Cette interdistance est donc proportionnelle à la différence TIV-TR. On peut alors considérer que dans le cadre de ce scénario, la différence entre TIV et TR constitue un assez bon indicateur du niveau de risque, avec un risque d'autant plus élevé que cette différence est faible. Ainsi, le niveau de risque est maintenu si une réduction du TIV est compensée par une réduction équivalente du TR.

Nous avons indiqué dans la Figure 39 les valeurs correspondantes à la réduction du TIV pour les vitesses de 13.9, 16.7 et 19.4 m/s (50, 60, et 70 km/h). Nous constatons que pour ces vitesses, la réduction du TIV serait effectivement compensée par la réduction du temps de réponse lors d'une réduction de 32 à 22.6 m. Par exemple, pour un conducteur roulant à 16.7 m/s à une densité de brouillard comparable à celle utilisée dans la présente expérience, des distances de suivie de 32 et de 22.6 m correspondent à des TIV de 1.92 et de 1.36 s. La réduction du TIV de 0.56 s serait alors entièrement compensée par la diminution du temps de réponse de 0.61 s. Il convient de noter que des vitesses de 13.9 à 19.4 m/s (50 à 70 km/h) correspondent à des vitesses couramment pratiquées dans les conditions de brouillard considérées (cf. Bulté, 1985 ; Hogema & van der Horst, 1994a ; White & Jeffery, 1980). Il semblerait donc que les conducteurs peuvent, dans une certaine gamme de distances, adopter des interdistances plus courtes sans nécessairement augmenter leur risque.

4 Discussion concernant le seuil de perception du mouvement relatif

La présente expérience avait pour but d'étudier l'effet du brouillard sur la perception du mouvement relatif dans une situation de suivi de véhicule. Il s'agissait notamment de savoir si la diminution des intervalles par temps de brouillard, fréquemment observée, pouvait être expliquée par un bénéfice perceptif, i.e. une détection plus rapide du rapprochement et de l'éloignement d'un véhicule lièvre.

Chapitre 3 : Perception du mouvement relatif

Notre étude démontre que le brouillard affecte de façon significative la sensibilité au mouvement relatif, dans le sens où le temps de discrimination du sens du mouvement est plus long en condition de brouillard que par temps clair. Une augmentation du temps de réponse (de 0.4 s environ dans les conditions de notre expérience) se produit lorsque le contraste entre la silhouette et le fond diminue de façon importante ($\leq 5.7\%$). Les résultats suggèrent que, l'augmentation du temps de réponse est due au faible contraste de la silhouette par rapport au fond lorsqu'elle est encore visible (5.7%) et à l'écartement réduit entre les feux lorsque la silhouette n'est plus suffisamment visible (1.9%). Pour les très faibles contrastes (0.4%), les feux arrière du véhicule deviennent dans ces conditions la source d'information prépondérante, voire exclusive, pour la perception d'une modification de l'interdistance. L'augmentation du seuil dans ces conditions peut être attribuée au faible écartement des deux feux qui réduit la taille angulaire comparée à celle de la silhouette, et diminue ainsi la vitesse angulaire. Cette interprétation est cohérente avec les résultats de Janssen et al. (1976) qui observent une plus grande sensibilité au mouvement relatif lorsque l'écartement entre les feux arrière est important. Ces résultats soulignent une nouvelle fois l'importance des caractéristiques des feux arrière de véhicule et la nécessité de prendre en compte des aspects perceptifs lors de leur conception. En effet, une augmentation de l'écartement entre les deux feux arrière permettrait non seulement de réduire l'interdistance perçue et ainsi de tendre à augmenter les intervalles par temps de brouillard (Cavallo et al., 2001), mais permettrait également de réagir plus tôt au rapprochement du véhicule suivi dans le cas où sa silhouette n'est pas visible.

L'augmentation des seuils en condition de brouillard ne reflèterait donc la diminution du contraste entre la silhouette et le fond que pour une petite gamme de contrastes autour de 5%, car pour une large gamme de contrastes, allant de 89.3% en condition de visibilité normale jusqu'à 11.3% en condition de brouillard, on n'observe pas d'effet sur la sensibilité au mouvement relatif. L'augmentation des seuils est donc essentiellement due à la disparition de la silhouette comme source d'information. Il semblerait d'autre part que la réduction du flux optique de l'environnement par le brouillard limite globalement cette augmentation du seuil. Ceci est notamment le cas pour la détection du rapprochement où le brouillard supprime des informations visuelles concurrentielles. En revanche, la détection de l'éloignement en condition de brouillard est rendue plus difficile du fait de la disparition d'un flux optique facilitateur.

Chapitre 3 : Perception du mouvement relatif

Au vu de ces résultats, la réduction des intervalles par temps de brouillard peut être comprise comme une adaptation de la part des conducteurs face à l'augmentation des seuils de détection du changement de l'interdistance. Les conducteurs susceptibles d'adopter cette stratégie pourraient être ceux pour lesquels l'intervalle habituel par temps clair est supérieur à la distance de suivi qui permet une bonne visibilité de la silhouette par temps de brouillard. Le gain sur le seuil de perception suite à une réduction de l'intervalle est particulièrement important lorsque l'intervalle habituel d'un conducteur est dans la zone de transition entre les conditions de bonne et de mauvaise visibilité de la silhouette. Dans ce cas précis, le gain perceptif suite à une réduction donnée de l'interdistance est plus important en conditions de brouillard que par temps clair.

Si le gain perceptif suite à la réduction de l'intervalle dans cette "zone de transition" est susceptible d'apporter un bénéfice du point de vue d'une régulation fine de l'intervalle avec le véhicule suivi, il est plus difficile d'évaluer les conséquences en termes de sécurité. L'intervalle de suivi peut être considéré comme une marge de sécurité (van der Hulst, Rothengatter, & Meijman, 1998), et sa réduction comme une augmentation du risque de collision. Nous avons vu à travers les calculs présentés précédemment, qu'une réduction de l'intervalle en condition de brouillard ne s'accompagne pas nécessairement d'une augmentation du risque de collision. Cette interprétation ne tient cependant pas compte de facteurs liés à la charge attentionnelle ou de facteurs motivationnels de prise de risque. Etant donné la portée limitée de ces calculs, nous préférons nous fier à des simulations basées sur des modèles de suivi de véhicule (cf. chapitre 4). Ce sera l'objet du chapitre suivant dans lequel nous chercherons également à déterminer si l'augmentation du seuil de perception du mouvement relatif dans le brouillard amène effectivement les conducteurs à réduire l'intervalle dans une situation de suivi de véhicule.

Chapitre 4 : Le contrôle de l'intervalle

1 Introduction

L'expérience présentée au chapitre 3 a permis de mesurer le seuil de perception du mouvement relatif (Caro, Cavallo, Marendaz, Boer, & Vienne, 2007a, 2007b). Les résultats font apparaître une augmentation du seuil lorsque la silhouette du véhicule lièvre n'est pas suffisamment visible, i.e. lorsque son contraste par rapport au fond est inférieur ou égale à 5.7%. Ce contraste correspond, avec la densité de brouillard utilisé (DVM=32 m), à une augmentation du seuil pour les interdistances longues (>32 m) mais pas pour les interdistances courtes (<22.6 m). Nous souhaitons maintenant savoir si l'augmentation du seuil de perception du mouvement relatif amène effectivement les conducteurs à réduire leur intervalle de suivi en condition de brouillard.

1.1 Modèles de suivi de véhicules

La situation de suivi de véhicule a été étudiée par de nombreux auteurs et a donné lieu à des modèles qui permettent d'appréhender plus facilement les phénomènes en œuvre. Nous allons donc présenter quelques modèles de suivi de véhicules qui semblent pertinents du point de vue de notre problématique. Il existe deux grandes approches dans la conception de modèles de suivi de véhicules. Il y a d'une part l'approche macroscopique visant à modéliser le comportement d'un ensemble de véhicules. Certains modèles macroscopiques font l'analogie entre le trafic routier et l'écoulement de fluides. D'autres établissent des équations qui décrivent le débit sur les tronçons de route en fonction des nœuds, i.e. des intersections. Le principal intérêt des modèles macroscopiques est qu'ils permettent l'étude du trafic et de phénomènes de grande ampleur. Il existe d'autre part l'approche microscopique qui cherche à décrire le comportement des véhicules de façon individuelle. Les modèles microscopiques portent sur les interactions entre quelques véhicules (généralement deux), et le conducteur est pris en compte de façon plus ou moins importante selon les modèles. Il existe enfin des modèles hybrides cherchant à unifier ces deux approches (Bourrel & Henn, 2002 ; Leclercq, 2007). Puisque notre objet d'étude est le conducteur, notre intérêt se porte vers les modèles microscopiques. Il existe différents types de modèles microscopiques, tels que les modèles

Newtoniens visant à calculer une interdistance sûre (Gipps, 1981) ou les modèles construits en logique floue (Henn, 1995, 1997). Etant donné notre problématique, nous nous intéressons plus particulièrement à des modèles qui se basent sur des seuils perceptifs et à certains modèles se basant sur les écarts par rapport à une situation de suivi de référence (en termes de vitesse relative et d'interdistance).

1.2 Modèles basés sur des seuils perceptifs

Le modèle *Action Point* décrit par Brackstone et McDonald (1999) et Brackstone, Sultan, et McDonald (2002) est basé sur des seuils perceptifs relatifs au changement d'interdistance, à la vitesse relative et/ou au taux d'expansion angulaire du véhicule lièvre. En se basant sur l'existence de ces seuils, les auteurs considèrent que dans l'espace interdistance – vitesse relative, il existe une surface à l'intérieur de laquelle le conducteur ne détecte aucun changement. Il cherche alors à maintenir une accélération constante tant qu'il est à l'intérieur de cette surface. En revanche lorsque l'un des seuils perceptifs est atteint, le conducteur réagit en accélérant ou en décélérant. Le modèle est construit autour des quatre valeurs suivantes :

- Une distance de suivi minimale désirée
- Une distance de suivi maximale désirée
- Un seuil pour reconnaître les petites vitesses relatives négatives (rapprochement)
- Un seuil pour reconnaître les petites vitesses relatives positives (éloignement)

Suite à une campagne de mesures menée en situation de conduite réelle, Brackstone et al. (2002) ont cherché à quantifier ces valeurs et à préciser la nature des seuils perceptifs sous-jacents. Ils ont ainsi cherché à mettre en relation les distances de suivi minimales et maximales avec le seuil différentiel (également appelé Just Noticeable Difference - JND) de la distance. Ils ont également cherché à savoir si les seuils de vitesse relative sont plutôt basés sur la vitesse proprement dite ou sur le taux d'expansion angulaire. Les auteurs n'ont cependant pas obtenu de réponse définitive à ces questions.

En l'absence de définition précise des éléments qui le constituent, ce modèle joue d'abord le rôle de cadre théorique. Van Winsum (1999) propose tout de même une définition plus précise de l'un des constituants de ce modèle : la distance de suivi minimale désirée. Il propose que cette distance minimale (D_d) corresponde à l'interdistance préférentielle (D_p)

moins la distance à laquelle le conducteur détecte la différence par rapport à l'interdistance préférentielle. Cette différence correspond au seuil différentiel, qui est ici exprimé en terme de taille angulaire du véhicule suivi. Si le seuil différentiel correspond à 10% de la taille angulaire initiale comme le suggère van Winsum, nous obtenons $Dd \approx 0.9 \cdot Dp$. Lorsque ce point serait atteint, le conducteur du véhicule suiveur commencerait à décélérer. En se basant sur des travaux antérieurs (Lee, 1976 ; van Winsum & Heino, 1996), van Winsum propose que la valeur de la décélération dépende du TTC perçu par le conducteur, dans le sens où la décélération est d'autant plus grande que le TTC perçu est petit.

1.3 Modèles basés sur les écarts par rapport à une situation de référence

Nous allons maintenant présenter des modèles pour lesquels on considère qu'il existe une situation idéale pour laquelle le conducteur n'a pas à réagir. En revanche, les écarts par rapport à cette situation de référence donnent lieu à une accélération ou une décélération ayant pour but de revenir vers cette situation de référence. L'un des premiers modèles de suivi de véhicules basé sur ce principe (Chandler, Herman, & Montroll, 1958 ; Herman, Montroll, Potts, & Rothery, 1959) est constitué par la formule suivante :

$$a(t) = c \cdot v^m(t) \cdot \frac{\Delta v(t-T)}{\Delta x^l(t-T)}$$

où $a(t)$ est l'accélération du véhicule suiveur à l'instant t , $v(t)$ est sa vitesse au même instant, et les valeurs $\Delta v(t-T)$ et $\Delta x(t-T)$ représentent respectivement la vitesse relative et l'interdistance à l'instant $t-T$. Le paramètre T représente le temps de réaction. L'accélération du véhicule suiveur à l'instant t dépend donc de la valeur qu'avaient les différentes variables à l'instant $t-T$. Les trois autres paramètres de ce modèle sont l , m , et c . De nombreux auteurs ont mené des expériences pour déterminer les valeurs de ces paramètres (e.g. Aron, 1988 ; Heyes & Ashworth, 1972), mais aucun consensus n'en est ressorti (Brackstone & McDonald, 1999). D'après Brackstone et McDonald, l'incohérence entre les paramètres obtenus par les différentes études peut être attribuée à la diversité des situations étudiées. On constate en effet que les valeurs prises par ces paramètres diffèrent grandement selon que le véhicule accélère ou décélère. De plus, certaines études portent sur des situations de conduite en ville avec des départs et arrêts fréquents, alors que ce n'est pas le cas pour d'autres. Dans ce modèle, la situation de référence correspond à une vitesse relative nulle. Ainsi lorsque la vitesse relative est nulle, le conducteur du véhicule suiveur garde une vitesse constante, i.e. une accélération

nulle. De plus, il accélère lorsque la vitesse relative est positive (éloignement du véhicule lièvre) et décélère lorsqu'elle est négative (rapprochement du véhicule lièvre). Par ailleurs, l'accélération et la décélération sont d'autant plus grandes que la vitesse propre est grande et que l'interdistance est courte. Ce dernier point constitue un aspect intéressant que nous retrouverons à travers les travaux de Boer, Ward, Manser, Yamamura, & Kuge (2005c). Ce modèle ne prend cependant pas en compte la notion d'intervalle préférentiel. L'interdistance peut tout aussi bien être très grande ou très courte sans qu'il y ait de tendance à revenir vers une interdistance moyenne. L'une des conséquences est que même lorsque l'intervalle est très court, le véhicule suiveur peut accélérer.

Le modèle de Helly (1959, cité par Brackstone & McDonald, 1999), décrit par les formules ci-dessous, intègre la notion d'intervalle préférentiel :

$$a(t) = C_1 \cdot \Delta v(t-T) + C_2 \cdot (\Delta x(t-T) - D(t))$$

$$D(t) = \alpha + \beta \cdot v(t-T) + \gamma \cdot a(t-T)$$

où a , Δv et Δx représentent comme précédemment l'accélération du véhicule suiveur, la vitesse relative, et l'interdistance. D représente l'interdistance préférentielle, qui dépend notamment de la vitesse propre (v) et de l'accélération (a). La différence entre Δx et D correspond ainsi à une erreur d'interdistance, qui est positive lorsque l'intervalle est trop grand et négative lorsqu'il est trop petit. Ainsi dans ce modèle, la situation de référence est décrite par une double condition : l'interdistance correspondant à l'interdistance préférentielle D et la vitesse relative étant nulle. Les écarts par rapport à cette situation de référence donnent lieu comme précédemment, à une accélération ou une décélération du véhicule suiveur. Un aspect intéressant de ce modèle est que les erreurs de vitesse relative et d'interdistance peuvent se compenser. Il est ainsi possible que le véhicule suiveur ne réagisse pas ou très peu, lorsqu'il est trop proche du véhicule lièvre mais que ce dernier s'éloigne ou lorsqu'il est trop loin du véhicule lièvre et que celui-ci se rapproche. Enfin, les paramètres C_1 et C_2 caractérisent respectivement les gains vis-à-vis de la vitesse relative et des erreurs d'interdistance. La réaction du véhicule suiveur est alors d'autant plus grande (accélérations importantes) que ces gains sont élevés.

Un certain nombre de modèles récents sont dérivés du modèle de Helly. On peut notamment citer Andersen et Sauer (2007) et Sauer, Andersen, et Saidpour (2004) qui ont

remplacé les variables vitesse relative et interdistance par des variables optiques directement perceptibles par le conducteur, i.e. la taille angulaire du véhicule suivi et le taux de variation de cette taille angulaire. L'utilisation de variables optiques directement perceptibles par le conducteur doit permettre au modèle de mieux modéliser son comportement.

De leur côté, Boer et al. (2005c) présentent un modèle qui se compose de trois parties constituant un système bouclé. Ces trois parties sont : une modélisation du conducteur, une modélisation du comportement du véhicule, i.e. l'accélération qui résulte des appuis sur la pédale d'accélération, et les règles de physique qui régissent le déplacement des véhicules. La modélisation du conducteur diffère de celle faite par le modèle de Helly sur trois points :

- La grandeur de sortie n'est pas l'accélération du véhicule mais les appuis sur la pédale d'accélérateur. Les auteurs supposent que le conducteur a une parfaite connaissance de la dynamique du véhicule.
- Le temps de réaction T n'est pas pris en compte. Le seul délai pris en compte correspond au pas de calcul de 200 ms.
- L'interdistance préférentielle correspond à un TIV constant, correspondant dans la formule du modèle précédent aux paramètres α et γ nuls.

Le paramètre τ^* du modèle de Boer et al. (2005c) et le paramètre β du modèle de Helly représentent tous les deux le TIV préférentiel du conducteur. De même, les paramètres C_0 et K_0 du modèle de Boer et al. (2005c) et les paramètres C_1 et C_2 du modèle de Helly représentent les gains vis-à-vis de la vitesse relative et de l'erreur d'intervalle.

1.4 Phénomènes non pris en compte par les modèles

Plusieurs auteurs mettent en avant les limites de ce type de modèles, qui selon eux, ne prennent pas en considération les facteurs psychologiques (Boer, 1999a ; Hancock, 1999 ; Ranney, 1999 ; van Winsum, 1999). Le point le plus critiqué est que les modèles décrivent un comportement optimal alors que les conducteurs cherchent seulement à conduire suffisamment bien pour accomplir leur tâche. Ils se satisfont alors d'une gamme de conditions plus larges que celles qui peuvent être obtenues par un contrôle optimal, i.e. un contrôle basé sur les limites perceptives et de contrôle du véhicule. Boer (1999a) et Hancock (1999) parlent alors de *satisficing task*. Le second point controversé est que les conducteurs ne portent pas

une attention permanente vers le véhicule suivi. L'activité de conduite étant composée de nombreuses tâches, les conducteurs doivent porter leur attention vers chacune d'entre elles de façon intermittente. Le conducteur serait alors amené à planifier la durée pendant laquelle il peut porter son attention sur une autre tâche (Lim, Sayed, & Navin, 2004). Le troisième point est que hormis le modèle *Action Point* et le modèle de Andersen et Sauer (2007) et Sauer, Andersen, et Saidpour (2004), ces modèles ne tiennent pas compte des variables perceptives utilisées par les conducteurs. Celles-ci sont par exemple les marges de sécurité temporelles, la taille angulaire, ou le taux d'expansion angulaire du véhicule lièvre. Enfin, Ranney et van Winsum soulignent un certain nombre de différences inter-individuelles, de facteurs motivationnels et de facteurs environnementaux susceptibles d'influencer l'intervalle de suivi. Ces facteurs ont une grande importance mais sont difficiles à prendre en compte dans les modèles tant ils sont nombreux. On peut citer à titre d'exemple, l'âge des conducteurs et leur propension à prendre des risques en ce qui concerne les différences inter-individuelles. La pression temporelle et la fatigue influencent directement les aspects motivationnels. On peut citer l'état du trafic et de la chaussée en ce qui concerne les facteurs environnementaux. Un autre facteur environnemental important est bien sûr la condition de visibilité.

Les travaux de Boer, Ward, Manser, et Kuge (2005b) et Boer et al. (2005c) tiennent compte de cette diversité puisqu'ils sont basés sur une approche différentielle. Les auteurs cherchent ainsi à identifier les paramètres de leur modèle (décrit ci-dessus) pour différents conducteurs ou pour différentes situations de conduite. Les travaux qu'ils ont menés font apparaître des résultats intéressants. Ils constatent d'une part que les gains C_0 et K_0 sont d'autant plus grands que τ^* est petit ; ce qui signifie que les conducteurs réagissent d'autant plus fort à la vitesse relative ou aux erreurs d'interdistance qu'ils sont proches du véhicule lièvre. La réaction d'autant plus forte que l'interdistance est courte correspond à l'un des aspects pris en compte par le modèle de Herman et al. (1959), présenté précédemment. Les auteurs constatent d'autre part que la bande passante, i.e. la fréquence maximale des mouvements de la pédale d'accélération, est d'autant plus grande que l'intervalle préférentiel est petit. Autrement dit, les conducteurs qui suivent le véhicule lièvre de près réagissent plus fort aux erreurs et ont des mouvements de pédales de plus grande fréquence. Les auteurs interprètent la plus grande fréquence et amplitude des mouvements de pédales comme un effort plus important pour contrôler l'intervalle. D'autre part, ils montrent lors d'une autre étude (Boer et al., 2005b) que la conduite est affectée par la présence d'une tâche secondaire. Cette tâche secondaire amène les participants à augmenter leur intervalle de suivi et à réduire

les gains C_0 et K_0 . D'après les auteurs, cette stratégie permet d'augmenter la marge de sécurité et de réduire l'attention nécessaire au contrôle de l'intervalle (d'où les gains plus faibles). L'attention peut ainsi être partagée de façon intermittente entre l'activité de conduite et la tâche secondaire. Pour résumer, ces travaux montrent le lien qui existe entre l'intervalle et la charge mentale, cette dernière étant d'autant plus élevée que l'intervalle est court. Nous allons voir que cette relation entre intervalle et charge mentale constitue un facteur important dans la stratégie choisie par les conducteurs.

1.5 Contraintes et stratégies liées au brouillard

Plusieurs expériences réalisées sur simulateur de conduite ont étudié le suivi de véhicule en condition de brouillard : Broughton, Switzer, et Scott (2007) ; Cavallo et al. (2007) ; Debus et al. (2005) ; Hogema et van der Horst (1994b) ; Kang, Ni, et Andersen (2008) ; Rosey et Espié (2007) ; van der Hulst (1999) ; ainsi que van der Hulst et al. (1998).

Pour la plus grande partie de ces expériences (Broughton et al., 2007 ; Debus et al., 2005 ; Hogema & van der Horst, 1994b ; Rosey & Espié, 2007 ; van der Hulst, 1999 ; van der Hulst et al., 1998), les participants n'avaient pas pour instruction de suivre le véhicule lièvre, mais seulement de conduire par temps clair ou en condition de brouillard (alors qu'un autre véhicule se trouvait sur la même route). Il a ainsi été mis en évidence que les participants cherchent à suivre le véhicule lièvre en condition de brouillard, quitte à réduire l'interdistance (Broughton et al.) ou à augmenter la vitesse (Debus et al.) afin de garder le véhicule en vue. L'expérience décrite par Cavallo et al. (2007), où les participants avaient pour consigne de suivre le véhicule lièvre, met également en évidence qu'une partie des participants est amené à réduire l'intervalle en condition de brouillard ($DVM=30$ m) afin de ne pas perdre le véhicule de vue.

En situation de conduite réelle, il ne suffit pas pour garder le véhicule suivi en vue, d'adopter un intervalle inférieur à la distance de visibilité. Il faut également réagir aux variations de vitesse du véhicule suivi (illustrées par les travaux de Bar-Gera & Shinar, 2005), ou à la variation de la densité du brouillard (nappes de brouillard plus ou moins dense). Dans tous les cas, le conducteur du véhicule suiveur doit prendre en compte la capacité qu'il pense avoir à détecter et à réagir à ces variations tout en gardant une marge. La distance de visibilité limitée des feux de brouillard est donc une contrainte importante sur l'intervalle adopté en condition de brouillard et sur sa régulation. Les résultats de White et Jeffery (1980) suggèrent

néanmoins que cette contrainte n'explique pas à elle seule la réduction des intervalles en condition de brouillard.

Cavallo et al. (2007) observent en effet une réduction de l'intervalle en condition de brouillard, même lorsque l'intervalle adopté par temps clair est plus petit que l'interdistance permettant de garder le véhicule en vue en condition de brouillard. La réduction d'intervalle observée par Cavallo et al. est de 0.4 s lorsque l'intervalle adopté par temps clair correspond à une interdistance où le véhicule suivi n'est vu que par ses feux lorsqu'il y a du brouillard. Ils observent également une réduction de 0.3 s lorsque l'intervalle adopté par temps clair correspond à une interdistance où la silhouette du véhicule suivi serait également visible en condition de brouillard. Contrairement à Cavallo et al. (2007), Hogema et van der Horst (1994b) n'observent pas d'effet de la visibilité (DVM de 40, 80, 120, et 600 m) sur le TIV adopté. Van der Hulst et al. (1998) observent même une augmentation de l'intervalle avec le brouillard (visibilité de 150 m). On notera que pour ces trois expériences, l'intervalle par rapport au véhicule lièvre était mesuré pendant des phases où ce dernier avait une vitesse constante. La différence de résultats entre ces trois expériences peut reposer sur des facteurs divers tels que la densité du brouillard ou le type de route simulée. Rosey et Espié (2007) montrent par exemple que les participants augmentent leur intervalle de suivi en condition de brouillard dense (DVM=60 m), en particulier lorsqu'ils roulent sur une route secondaire. En revanche, lorsque le brouillard devient très dense (DVM=30 m), les intervalles adoptés sont proches de ceux adoptés par temps clair. On peut donc s'attendre à ce que certains facteurs amènent les participants à adopter différentes stratégies.

La possibilité pour les participants d'adopter différentes stratégies en condition de brouillard est mise en avant par les travaux de van der Hulst et al. (1998). La première stratégie qu'ils ont observée consiste à augmenter l'intervalle avec le véhicule suivi lorsqu'il y a du brouillard. Cette augmentation de la marge de sécurité permet de faire face plus facilement à une décélération inattendue du véhicule lièvre. Il est en effet difficile en condition de brouillard, d'anticiper les décélérations du véhicule lièvre qui peuvent être dues à la présence de virages, d'obstacles, ou à la décélération du véhicule devant lui. La seconde stratégie observée par les auteurs consiste à maintenir le même intervalle que par temps clair, tout en focalisant l'attention vers le véhicule lièvre afin de faire face rapidement aux décélérations inattendues. Une attention plus soutenue a cependant un coût cognitif important.

C'est pourquoi cette seconde stratégie a été observée lorsque les participants étaient sous pression temporelle.

1.6 Le seuil de perception du mouvement relatif

Un autre phénomène susceptible d'influencer le contrôle de l'intervalle est l'augmentation du seuil de perception du mouvement relatif avec le brouillard. C'est l'influence de ce phénomène que nous souhaitons étudier. Pour savoir quels pourraient être ses effets, nous nous référons aux modèles de suivi de véhicules. D'après le modèle *Action Point* décrit ci-dessus, les variations de l'interdistance et la vitesse relative résultent des limites perceptives des conducteurs. En se référant aux résultats de l'expérience précédente, on peut considérer que les variations de l'interdistance et la vitesse relative devraient être équivalentes pour les deux conditions de visibilité lorsque l'interdistance est inférieure à 22.6 m. Au contraire, les variations devraient être plus importantes en condition de brouillard que par temps clair pour les interdistances supérieures à 32 m, ce qui peut être interprété comme un contrôle moins précis de l'intervalle.

Pour évaluer plus précisément les conséquences de l'augmentation du seuil de perception du mouvement relatif, les résultats de l'expérience précédente ont été intégrés dans un modèle de suivi de véhicule (Boer, Caro, & Cavallo, 2007, 2008). Pour ce faire, le modèle de Boer et al. (2005c) décrit ci-dessus a été adapté sur deux points. D'abord les variables interdistance et vitesse relative ont respectivement été remplacées par la taille angulaire du véhicule suivi et par sa dérivée (vitesse angulaire). Ensuite, un module perceptif a été ajouté de façon à représenter la perception intermittente et retardée du mouvement relatif. Comme pour le modèle *Action Point*, on suppose que le conducteur ne perçoit aucun mouvement tant que le seuil différentiel n'est pas dépassé. Les lois décrivant le seuil différentiel en fonction de la condition de visibilité et de la taille angulaire est basée sur les résultats de l'expérience décrite au chapitre précédent, de façon à modéliser l'effet de la réduction du contraste :

$$JND_{\text{temps_clair}} = 0.065 + \frac{9.79 \times 10^{-4}}{\varphi_{(\text{précédent})} + 0.001}$$

$$JND_{\text{brouillard}} = 0.07 + \frac{e^{-14.86}}{(\varphi_{(\text{précédent})})^{4.17}}$$

où JND représente le seuil différentiel et $\varphi_{(précédent)}$ représente la taille angulaire du véhicule la dernière fois que le seuil différentiel a été franchi, i.e. la dernière fois qu'un changement de taille angulaire a été détecté. Des simulations ont ensuite été menées pour différentes conditions de visibilité, de vitesse, et d'interdistance préférentielle. Les résultats montrent que par temps clair, la sécurité (mesurée par le TIV minimum) est d'autant plus grande que l'intervalle préférentiel est grand, et que la décélération maximale est d'autant plus faible que l'intervalle préférentiel est grand. D'après les auteurs, et nous le reverrons dans ce chapitre, des décélérations plus faibles indiquent un effort réduit pour le contrôle de l'intervalle. Il serait donc préférable par temps clair d'adopter l'intervalle le plus grand possible. Au contraire en condition de brouillard, l'intervalle préférentiel offrant le maximum de sécurité est de l'ordre de deux à trois secondes selon la vitesse. De plus, la zone permettant de limiter les décélérations, et donc de réduire l'effort, se trouve entre deux et trois secondes pour la plus basse vitesse (13.9 m/s) et entre une et deux secondes pour les deux autres vitesses (18.9 et 23.9 m/s). D'après cette simulation, il existe en condition de brouillard un intervalle optimal qui serait compris entre une et trois secondes selon la vitesse et le type de mesure considéré.

1.7 Hypothèses

Nous faisons l'hypothèse que l'augmentation du seuil de perception du mouvement avec le brouillard pour les interdistances supérieures à 32 m influence le comportement de conduite en situation de suivi de véhicule. Nous supposons que cette influence prend plusieurs formes :

1. Nous faisons l'hypothèse que le contrôle des intervalles supérieurs à 32 m est moins précis en condition de brouillard que par temps clair, alors qu'il est aussi précis pour les intervalles inférieurs à 22 m.
2. Nous supposons également qu'un seuil plus élevé augmente la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle, qui est plus importante en condition de brouillard que par temps clair pour les intervalles supérieurs à 32 m, alors qu'elle est équivalente pour les intervalles inférieurs à 22 m.
3. Nous supposons enfin que les participants dont l'intervalle préférentiel correspond à une interdistance proche de 32 m ont tendance à se rapprocher du véhicule lièvre. Nous pensons que cette hypothèse s'applique en particulier aux participants ayant une

interdistance préférentielle proche de 32 m (disons 32 +/- 5 m), puisque le gain associé à une réduction donnée de l'intervalle y est maximal. Nous pensons qu'une réduction modérée de l'intervalle leur permet de contrôler plus précisément l'intervalle et/ou de réduire la charge mentale (selon les résultats sur ces deux mesures). Autrement dit, nous faisons l'hypothèse que les participants adoptent des intervalles plus courts en condition de brouillard que par temps clair lorsque leur TIV préférentiel correspond à une distance ne permettant pas de voir correctement la silhouette du véhicule et pour lequel une réduction modérée du TIV permet de voir correctement la silhouette.

2 Méthode

2.1 Matériel expérimental

L'expérience a été réalisée sur le simulateur de conduite de l'INRETS. Il se composait de trois écrans sur lesquels étaient projetées les images générées. Le poste de conduite était matérialisé par un véhicule placé devant les écrans. La distance entre l'observateur et l'écran central était de 2.7 m, et les trois écrans couvraient un angle de vision de 150° dans le sens horizontal et de 45° dans le sens vertical. La résolution des images projetées était 1024 x 768, et la fréquence de rafraichissement des images était de 37.5 Hz. Des scènes routières diurnes pouvant avoir lieu par temps clair ou en condition de brouillard ont été projetées sur les écrans. Le brouillard était simulé par une fonction OpenGL (Open Graphics Library), et a été amélioré de façon à faire apparaître les halos autour des feux.

L'expérience de suivi de véhicule présentée ici comportait des parcours en ligne droite qui sont l'objet du présent chapitre, ainsi que des parcours sur route sinueuse qui feront l'objet du chapitre 5, portant sur le contrôle de trajectoire. La route en ligne droite utilisée (Figure 40) avait une longueur de 40 km et la route sinueuse se composait de virages à droite et à gauche de rayons de courbure 100 et 200 m. Dans les deux cas, la chaussée se composait de deux voies de 3.5 m de large, séparées par un marquage axial discontinu. La chaussée texturée était de couleur grise et était délimitée par des lignes continues. Les bas-côtés étaient verts, et des arbres étaient plantés sur les bords de route. Un véhicule (véhicule lièvre) était également simulé. Il s'agissait d'un véhicule léger noir, équipé de deux feux arrière de brouillard dont l'intensité lumineuse simulée était 300 candelas. Il s'agissait du même véhicule que celui

utilisé dans l'expérience portant sur la perception du mouvement. D'autre part, des véhicules circulaient dans le sens opposé (sauf pour la période de familiarisation). Ils roulaient à 16 m/s et étaient espacés de 1443 m. Enfin, le point d'arrivée était matérialisé par des maisons, des véhicules stationnés, et des piétons sur le bas-côté (sauf pour la période de familiarisation).

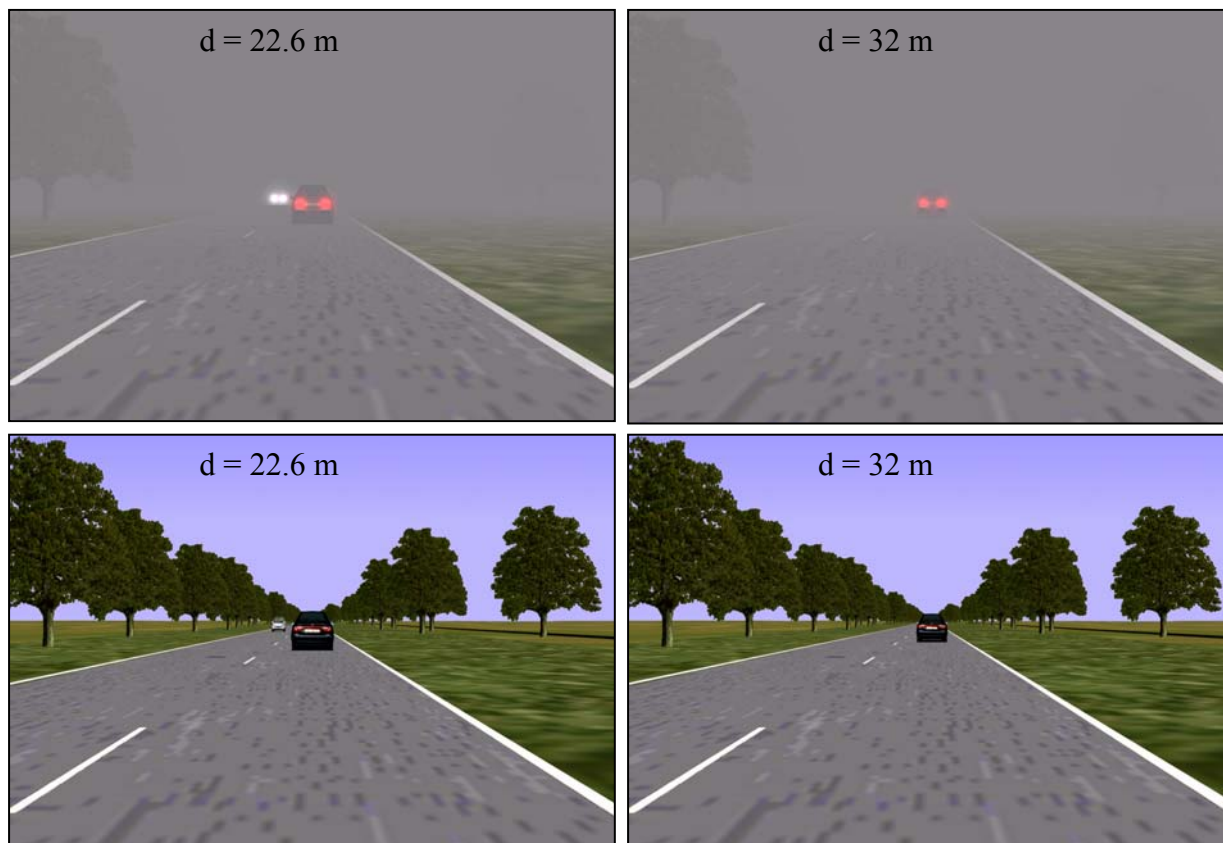


Figure 40 : Captures de l'écran central du simulateur représentant la route en ligne droite et le véhicule lièvre vu de l'arrière. La distance (d) entre l'observateur et le pare-choc arrière du véhicule lièvre est indiquée sur chaque image. La densité du brouillard sur les images du haut correspond à une Distance de Visibilité Météorologique de 32 m. Les images de gauche présentent une situation où un autre véhicule roule dans le sens opposé.

2.2 Comportement du véhicule lièvre

Nous souhaitons réaliser une expérience où les variations de vitesse du véhicule lièvre étaient identiques en ligne droite et sur route sinueuse. De plus, le rayon de courbure des virages de la route sinueuse était trop faible pour que les variations de vitesse soient indépendantes des courbures de la route. Pour cette raison, il n'a pas été possible d'utiliser des variations de vitesses construites à partir de sommes de sinusoides comme l'avaient fait Andersen et Sauer (2007). Nous avons donc fait en sorte que les variations de vitesse du véhicule lièvre dépendent des courbures de la route sinueuse en nous basant sur la vitesse

adoptée par plusieurs participants. Pour ce faire, nous avons réalisé une pré-expérimentation où six participants devaient parcourir trois tours de circuit de la route sinueuse en conduite libre. Il leur était demandé de rouler comme ils l'auraient fait en situation réelle. Nous avons ensuite travaillé les profils de vitesse qui avaient été enregistrés à cette occasion de façon à satisfaire plusieurs contraintes. Les explications relatives à ces traitements sont présentées en Annexe 6 (page 272). A l'issue de ces traitements, les variations de vitesse du véhicule lièvre étaient comprises entre -6 et +4.8 m/s autour de la vitesse moyenne choisie (Figure 41) et ses accélérations étaient comprises entre -1.5 et $+1$ m/s².

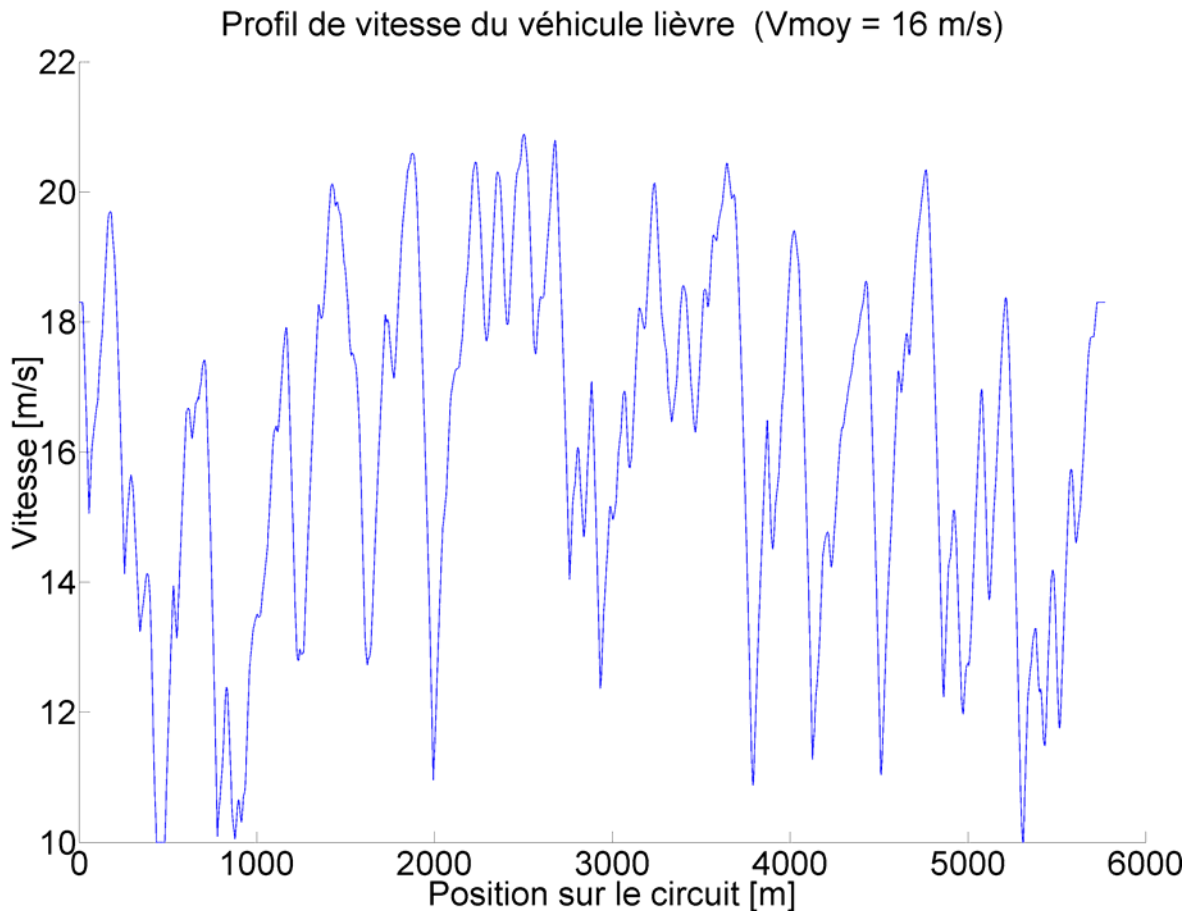


Figure 41 : Vitesse du véhicule lièvre (m/s) en fonction de sa position sur la route (m), dans le cas où la vitesse moyenne est 16 m/s.

2.3 Visibilité des feux de brouillard du véhicule lièvre

On considère généralement qu'un objet peut être vu lorsque son contraste de luminance est supérieur à 5% (Paulmier, 2004). C'est cette règle que nous utilisons pour savoir si la silhouette du véhicule est visible en condition de brouillard, malgré le caractère arbitraire du seuil choisi. La visibilité des feux de brouillard se distingue de celle de la silhouette sur deux

points. D'une part, les feux sont de couleur rouge alors que le brouillard est gris. Le contraste de luminance ne semble donc pas être une mesure adéquate puisqu'elle ne prend pas en compte toutes les informations susceptibles d'être utilisées par le système visuel pour percevoir les feux. D'autre part, les halos modifient la transition entre les feux et le fond. Les feux seraient d'autant moins visible que la transition est progressive. Ces deux points nous amènent à nous interroger sur la distance à laquelle peuvent être vus les feux de brouillard arrière du véhicule lièvre en condition de brouillard.

Pour répondre à cette question, nous avons fait appel à sept participants lors d'une seconde pré-expérimentation. Il leur a été présenté une situation où ils se déplaçaient à 16 m/s en condition de brouillard et où le véhicule lièvre roulait devant eux. Le véhicule lièvre s'est éloigné jusqu'à être perdu de vue, puis après quelques instants il s'est rapproché jusqu'à réapparaître. Cette séquence a été répétée trois fois et la vitesse relative était de ± 1 m/s. Il était demandé aux participants d'appuyer sur le bouton d'un boîtier réponse dès que le véhicule disparaissait, puis d'appuyer à nouveau dès qu'il réapparaissait. Les réponses ont été enregistrées et ont été utilisées pour déclencher l'enchaînement des événements (changement de signe de la vitesse relative). Les résultats montrent que la distance entre l'observateur et le pare-chocs arrière du véhicule lièvre est en moyenne de 79 m ($\sigma=0.68$) lorsque les feux disparaissent, et en moyenne de 75.5 m ($\sigma=0.88$) lorsqu'ils réapparaissent. Nous en déduisons que les feux de brouillard du véhicule lièvre peuvent être vus jusqu'à une distance de 77.2 m. Il faut cependant noter qu'il s'agit de la distance maximale à laquelle les feux peuvent être vus, et n'est de ce fait pas comparable avec la distance de visibilité de la silhouette calculée avec un seuil de 5%. Le seuil de 5% assure en effet une visibilité confortable de la silhouette qui peut également être vue à de plus grandes distances.

2.4 Participants

67 participants ont pris part à l'expérimentation. Parmi eux, 48 participants ayant entre 21 et 68 ans ont mené l'expérimentation jusqu'à son terme, les 19 autres participants ayant interrompu l'expérimentation pour raison de cinétose. Ils étaient détenteurs du permis de conduire depuis au moins deux ans et avaient déjà parcouru plus de 20 000 km. Ils avaient une vision normale ou corrigée à la normale, conformément au Code de la Route.

2.5 Tâche

La tâche des participants consistait à suivre le véhicule lièvre en conduisant le véhicule dans lequel ils étaient assis.

Les consignes données aux participants sont présentées en Annexe 7 (page 278). D'après les consignes, les participants devaient suivre le véhicule lièvre "sans le perdre de vue, et en empêchant qu'un autre véhicule puisse s'intercaler entre eux". Il est à préciser qu'aucun véhicule ne cherche à s'intercaler entre eux et le véhicule lièvre. Cette formulation a pour but d'éviter que les participants ne suivent le véhicule lièvre de trop loin. Si c'était le cas, ils devraient s'en rapprocher pour le garder en vue en condition de brouillard. Or, nos hypothèses portent sur les mécanismes perceptifs et de contrôle du véhicule. Pour tester ces hypothèses, il est nécessaire que l'adoption d'intervalles plus courts par temps de brouillard ne soit pas motivée par la nécessité de garder le véhicule en vue. Comme la distance maximale à laquelle les feux du véhicule peuvent être vus en conditions de brouillard est de 77.2 m, il est nécessaire que l'interdistance adoptée par temps clair soit au maximum de 77.2 m. Cette distance correspond à un intervalle de 3 s pour la vitesse maximale (26.1 m/s). Pour satisfaire cette contrainte nous avons proposé deux possibilités d'action. La première consiste à un recadrage des participants lors de la période de familiarisation. Ainsi lorsque l'intervalle adopté était supérieur à 3 s au cours de la période de familiarisation, la consigne était répétée aux participants en insistant sur le fait qu'aucun véhicule ne devait s'intercaler entre eux et le véhicule lièvre. La seconde possibilité envisagée était d'exclure les participants adoptant des intervalles trop longs. Le recadrage ayant permis aux 15 participants qui adoptaient des intervalles trop longs de les corriger, nous n'avons pas eu à exclure de participants.

2.6 Variables

L'expérience comporte dix conditions expérimentales, qui sont présentées dans le Tableau 5 en fonction des variables indépendantes impliquées. Les conditions expérimentales correspondent à l'emboîtement de trois variables : la condition de visibilité, le type de contrôle, et la vitesse moyenne. La variable condition de visibilité a une modalité visibilité normale et une modalité brouillard. La Distance de Visibilité Météorologique de ce brouillard est de 32 m. Les feux de brouillard du véhicule lièvre sont allumés en condition de brouillard. La variable type de contrôle a trois modalités correspondant aux situations suivantes :

Chapitre 4 : Contrôle de l'intervalle

- les situations pour lesquelles le contrôle de l'intervalle est prédominant : la route en ligne droite est utilisée et le véhicule lièvre a une vitesse variable
- les situations pour lesquelles le contrôle de trajectoire est prédominant : la route sinueuse est utilisée et le véhicule lièvre a une vitesse constante
- les situations pour lesquelles les deux types de contrôles sont présents : la route sinueuse est utilisée et le véhicule lièvre a une vitesse variable

On constate que la variable *type de contrôle* dépend à la fois du *type de route* (ligne droite ou sinueuse) et du *type de vitesse* du véhicule lièvre (constante ou variable). Nous pourrions ainsi parler du *type de contrôle* lorsque l'expérience sera considérée dans son ensemble ou parler du *type de route* et du *type de vitesse* lorsque le point de vue sera plus spécifique. Pour la modalité où le contrôle de l'intervalle est prédominant, il y a une variable *vitesse* qui représente la vitesse moyenne du véhicule lièvre. Les trois modalités de cette variable sont nommées *vitesse 1*, *vitesse 2*, et *vitesse 3*, et correspondent respectivement à des vitesses moyennes de 12.8, 16, et 21.3 m/s (46, 58, et 77 km/h). Ces trois vitesses permettent de faire correspondre l'interdistance de 32 m qui est au cœur de nos hypothèses, à des TIV de respectivement 2.5, 2, et 1.5 s. Les effets attendus autour de 32 m devraient donc apparaître pour des groupes de participants différents selon la vitesse moyenne. Les effets sont attendus pour les participants ayant un intervalle préférentiel de l'ordre de 2.5 s à 12.8 m/s, pour ceux ayant un intervalle préférentiel de l'ordre de 2 s à 16 m/s, et pour ceux ayant un intervalle préférentiel de l'ordre de 1.5 s à 21.3 m/s.

| N° condition expérimentale | Condition de visibilité | Type de contrôle prédominant | Type de route | Type de vitesse | Vitesse moyenne |
|----------------------------|-------------------------|------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | Normale | Intervalle | Ligne droite | Variable | 12.8 m/s |
| 2 | Normale | Intervalle | Ligne droite | Variable | 16 m/s |
| 3 | Normale | Intervalle | Ligne droite | Variable | 21.3 m/s |
| 4 | Normale | Trajectoire | Route sinueuse | Constante | 16 m/s |
| 5 | Normale | Les deux | Route sinueuse | Variable | 16 m/s |
| 6 | Brouillard | Intervalle | Ligne droite | Variable | 12.8 m/s |
| 7 | Brouillard | Intervalle | Ligne droite | Variable | 16 m/s |
| 8 | Brouillard | Intervalle | Ligne droite | Variable | 21.3 m/s |
| 9 | Brouillard | Trajectoire | Route sinueuse | Constante | 16 m/s |
| 10 | Brouillard | Les deux | Route sinueuse | Variable | 16 m/s |

Tableau 5 : Présente les dix conditions expérimentales en fonction des variables indépendantes impliquées. Chaque ligne correspond à une condition expérimentale. Le type de contrôle prédominant dépend du type de route et du type de vitesse.

2.7 Procédure

Les participants ont commencé par lire la feuille d'information (Annexe 7, page 277) et signer le formulaire de consentement éclairé. Ils ont ensuite été soumis à un test de vision à l'aide d'un appareil Ergovision afin de vérifier que leur vue était conforme au Code de la Route. L'expérimentation d'une durée totale d'environ deux heures et trente minutes était composée de deux périodes de conduite, dont la durée cumulée est de une heure et six minutes. La première est la période de familiarisation et la seconde correspond à la passation des conditions expérimentales. Pour ces deux périodes, les participants étaient installés dans le simulateur de conduite à la place du conducteur.

La période de familiarisation avec le simulateur se compose de deux parcours sur la route sinueuse d'une durée de huit minutes chacun. Le premier parcours a lieu en condition de visibilité normale et le second en condition de brouillard. Le véhicule lièvre adopte une

vitesse variable autour de 16 m/s, telle qu'elle a été décrite précédemment. La vitesse variable du véhicule lièvre et les virages ont pour but de permettre aux participants de se familiariser avec la dynamique de leur véhicule à la fois pour le contrôle de l'intervalle et pour le contrôle de trajectoire. La seconde période de conduite se compose de dix parcours correspondant aux dix conditions expérimentales. L'ordre de passation de ces parcours a été contrebalancé selon la *condition de visibilité*, puis selon le *type de contrôle* prédominant. Enfin, les trois conditions où le contrôle de l'intervalle est prédominant (ligne droite) ont été présentées dans l'ordre d'une vitesse moyenne croissante ou décroissante. Nous obtenons ainsi 24 ordres différents qui sont présentés en Annexe 8 (page 280).

Pour chaque parcours le véhicule lièvre était simulé comme étant initialement à l'arrêt devant le véhicule du participant. Chaque parcours est ensuite composé de quatre phases :

1. Une phase de démarrage au cours de laquelle l'accélération du véhicule lièvre est de 2.5 m/s^2 jusqu'à 7 m/s, puis de 0.5 m/s^2 jusqu'à la vitesse moyenne désirée.
2. Une phase d'adaptation d'une durée d'une minute (ne pas confondre avec la période de familiarisation d'une durée de 2×8 minutes). Cette phase a pour but de permettre aux participants de d'adapter leur comportement aux conditions de visibilité et à la vitesse du véhicule lièvre.
3. Une phase expérimentale d'une durée de trois minutes. Cette durée correspond à des distances parcourues de 2.3, 2.9, et 3.8 km lorsque les vitesses moyennes sont respectivement de 12.8, 16, et 21.3 m/s. Seules les données correspondant à cette phase ont été utilisées pour les traitements.
4. Une phase d'arrêt commençant par dix secondes d'attentes à vitesse constante. La décélération du véhicule lièvre est ensuite de 1 m/s^2 jusqu'à 7 m/s, puis de 1.5 m/s^2 jusqu'à l'arrêt.

Pour la période de familiarisation avec le simulateur (2×8 minutes), il n'y a pas de distinction entre les phases 2 et 3 (phases d'adaptation et expérimentale). Elles sont regroupées en une seule phase d'une durée de sept minutes, au cours de laquelle la vitesse moyenne est 16 m/s.

Après les deux périodes de conduite, l'expérience se terminait par un court entretien avec les participants, au cours duquel ils répondaient à un questionnaire post-expérimental

(présenté en Annexe 7, page 279). Concernant les pauses, une pause de 15 à 20 minutes était prévue au milieu de la période expérimentale. Il était de plus précisé aux participants qu'ils pourraient faire des pauses lorsqu'ils le souhaiteraient. D'autre part, les consignes étaient lues aux participants avant la première période de conduite. Elles leur étaient ensuite rappelées au début de la seconde période de conduite, et après chaque pause d'une durée conséquente. Elles étaient également rappelées au cours de la période de familiarisation avec le simulateur dans les cas où l'intervalle adopté était trop grand.

3 Résultats

Comme nous l'avons vu, notre hypothèse se compose de trois volets portant respectivement sur la précision du contrôle de l'intervalle, sur la charge mentale, et sur les intervalles adoptés. Ces trois volets ont été étudiés à partir des données de l'expérience de suivi de véhicule. Puisque ces hypothèses portent sur le contrôle de l'interdistance, nous nous sommes uniquement intéressés aux conditions de conduite en ligne droite. Le traitement des résultats a porté uniquement sur la phase expérimentale de chaque parcours, qui a une durée de trois minutes. De plus nos hypothèses portent sur la distance entre les deux véhicules, nous avons donc traité l'interdistance et non pas le TIV. Enfin, la conduite sur route sinueuse provoque le mal du simulateur et plusieurs participants ont dû arrêter l'expérience. Sur les 67 participants, seuls 48 ont mené l'expérience jusqu'à son terme. Le traitement des résultats a donc été fait sur les données de ces 48 participants.

3.1 Précision du contrôle de l'intervalle

Le seuil de perception du mouvement est plus élevé en condition de brouillard que par temps clair pour les interdistances supérieures à 32 m. La performance du contrôle de l'intervalle devrait donc être dégradée en condition de brouillard pour ces interdistances, et pas pour celles inférieures à 22 m. Pour tester cette hypothèse, nous souhaitons utiliser un indicateur de performance. La performance du contrôle de l'intervalle est généralement comprise comme la précision avec laquelle l'intervalle est contrôlé. Puisque de nombreux travaux montrent l'existence d'un intervalle préférentiel vers lequel tendent les conducteurs, la précision du contrôle de l'intervalle peut être mesurée par l'amplitude des variations autour de

cette valeur préférentielle ; la précision étant d'autant plus grande que les variations sont faibles. Nous avons donc utilisé l'écart type de l'interdistance comme mesure de performance.

3.1.1 Ecart type de l'interdistance

La Figure 42 présente pour chaque condition de vitesse, l'écart type de l'interdistance en fonction de l'interdistance moyenne et de la condition de visibilité. La construction des points présentés sur la figure se fait de la façon suivante : On calcule d'abord l'interdistance moyenne de chaque participant sur la zone d'étude de chaque parcours, ainsi que l'écart type de l'interdistance. Les participants sont ensuite regroupés par tranches de 5 m selon leur interdistance moyenne. Les coordonnées de chaque point affiché correspondent alors au milieu de la tranche de 5 m en l'abscisse, et à la valeur moyenne de l'écart type pour les participants regroupés en ordonnée. Un nombre noir à côté des points affichés indique le nombre de participants qu'ils représentent. Les points sont d'autant plus gros qu'ils représentent un grand nombre de participants. Enfin, les points ne représentant qu'un seul participant n'ont pas été affichés. Des figures similaires seront présentées dans ce chapitre et dans le chapitre suivant. La méthode de construction des figures étant similaire, elle ne sera plus détaillée.

On constate sur la Figure 42 que l'écart type de l'interdistance augmente avec l'interdistance moyenne. D'autre part, l'influence de l'interdistance moyenne sur l'écart type est similaire pour les trois conditions de vitesse. Nous avons donc rassemblé les données des trois conditions de vitesse dans un même graphique (Figure 43).

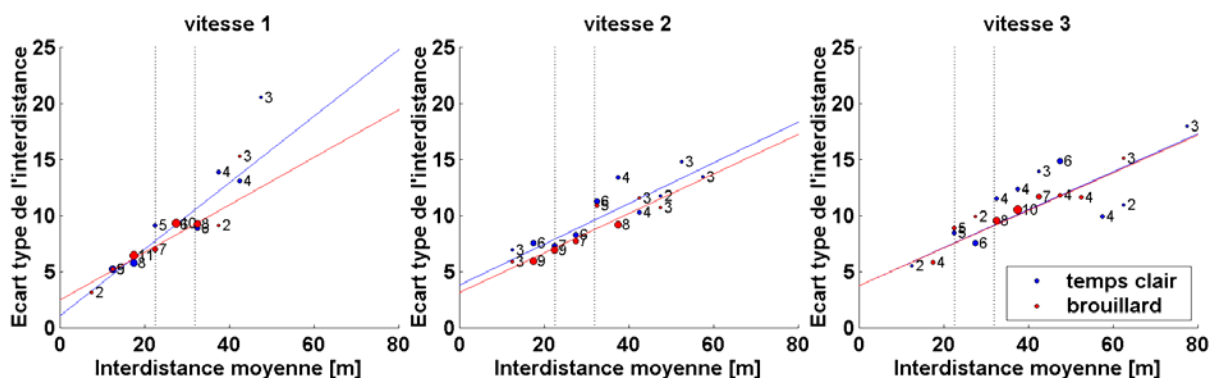


Figure 42 : Ecart type de l'interdistance en fonction de l'interdistance moyenne (m) et de la condition de visibilité. Les graphiques de gauche à droite correspondent respectivement aux vitesses moyennes de 12,8, 16, et 21,3 m/s. Les deux lignes pointillées verticales délimitent les gammes d'interdistances pour lesquelles le

Chapitre 4 : Contrôle de l'intervalle

brouillard augmente (à droite) ou n'augmente pas (à gauche) le seuil de perception du mouvement relatif. Les points correspondent à des regroupements de participants qui adoptent des intervalles proches (par tranches de 5 m). La taille des points dépend du nombre de participants qu'ils représentent (nombres indiqués en noir).

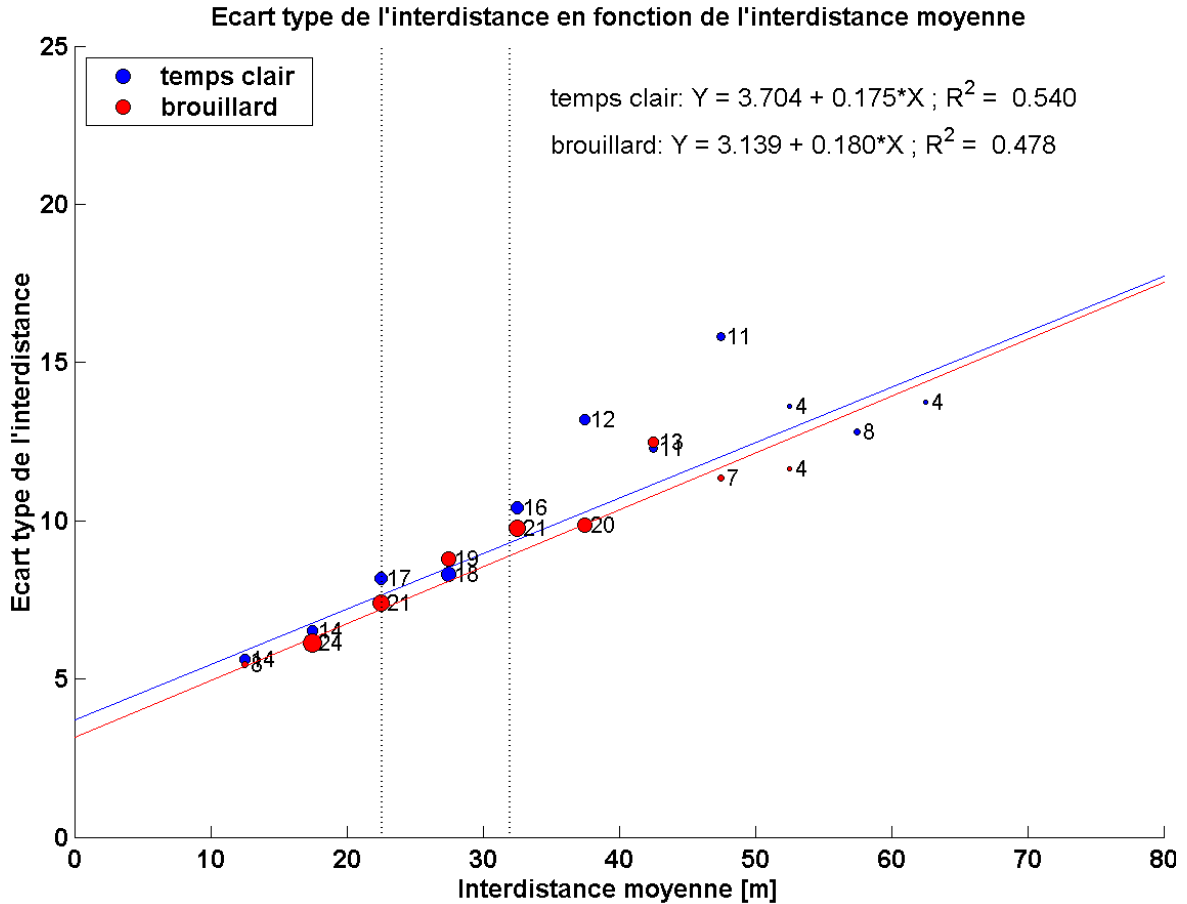


Figure 43 : Ecart type de l'interdistance en fonction de l'interdistance moyenne (m) et de la condition de visibilité, pour les trois conditions vitesses confondues. Les deux lignes pointillées verticales délimitent les gammes d'interdistances pour lesquelles le brouillard augmente (à droite) ou n'augmente pas (à gauche) le seuil de perception du mouvement relatif. Les points correspondent à des regroupements de participants qui adoptent des intervalles proches (par tranches de 5 m). La taille des points dépend du nombre de participants qu'ils représentent (nombres indiqués en noir).

3.1.2 Discussion concernant la précision du contrôle de l'intervalle

On constate sur la Figure 43 que la pente des droites de régression n'est que de 0.18 ; ce qui signifie que lorsque l'interdistance augmente, la variabilité augmente moins vite que l'interdistance. On constate enfin que l'écart type de l'interdistance ne dépend pas de la condition de visibilité. Notre hypothèse concernant la précision du contrôle de l'intervalle n'est donc pas vérifiée. Comme nous l'avons évoqué, les participants n'ont peut être pas cherché à contrôler l'intervalle de façon optimale mais seulement à le contrôler suffisamment

bien pour accomplir leur tâche, i.e. à maintenir l'intervalle dans une fourchette de tolérance autour de l'intervalle préférentiel (Boer, 1999a). Dans ce cas, les modèles basés sur les limites perceptives ne peuvent pas directement rendre compte de la précision mesurée. On peut néanmoins supposer que si les seuils perceptifs sont plus élevés en condition de brouillard que par temps clair, et si les variations de l'intervalle tolérées sont équivalentes pour les deux conditions de visibilité, alors l'effort fait pour contrôler l'intervalle devrait être plus élevé en condition de brouillard que par temps clair. Pour vérifier cette hypothèse nous allons chercher à mesurer la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle.

3.2 Charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle

Après avoir constaté que la condition de visibilité n'a pas d'influence sur la précision du contrôle de l'intervalle, nous nous intéressons au second volet de nos hypothèses ayant trait à la charge mentale. Nous faisons l'hypothèse que la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle est plus importante en condition de brouillard qu'en condition de visibilité normale pour les interdistances supérieures à 32 m, par opposition aux interdistances inférieures à 22 m. Pour tester cette hypothèse, il est nécessaire de quantifier la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle. Une méthode classique de mesure de la charge mentale repose sur l'introduction d'une seconde tâche, où la charge mentale est évaluée à travers la performance des participants. Cette méthode est cependant peu valide puisqu'elle présente des difficultés d'interprétations (Malaterre, 1994). Les mesures physiologiques (e.g. le rythme cardiaque) sont également utilisées mais présentent l'inconvénient d'être invasives, et sont donc susceptibles de modifier le comportement des participants. Il est donc préférable de se tourner vers une mesure de la charge mentale à partir des enregistrements comportementaux (i.e. les actions sur les commandes du véhicule). Ce type de mesure existe pour évaluer la charge mentale allouée au contrôle de la trajectoire, en se basant sur les mouvements de volant (e.g. le Steering Wheel Reversal Rate, cf. ci-dessous et chapitre 5). Or à notre connaissance, il n'y a pas eu de recherches visant à mettre au point une telle mesure pour évaluer la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle. Suite à ce constat, nous proposons ci-dessous deux méthodes de calcul qui tentent de répondre à cette attente : le "Pedal Reversal Rate" et l'amplitude maximale des mouvements de pédales.

3.2.1 *Mise au point du Pedal Reversal Rate*

Le Steering Wheel Reversal Rate (SRR) est une mesure basée sur les mouvements de volant. Il s'agit de mesurer le nombre d'inversions du sens de mouvement du volant pour une durée donnée. Plusieurs travaux ont permis de valider le SRR comme mesure de la charge mentale allouée au contrôle de trajectoire (Mac Donalds & Hoffmann, 1980 ; Malaterre, 1994 ; Malaterre et al., 1992). Par ailleurs, plusieurs autres mesures de la charge mentale allouée au contrôle de trajectoire portent également sur la fréquence des mouvements de volant. Nous avons étudié le SRR à partir des données de la présente expérience. Les résultats ainsi qu'une analyse plus détaillée de la bibliographie seront présentés dans le chapitre suivant qui porte sur le contrôle de trajectoire. Nous y verrons qu'il existe une méthode classique de mesure du SRR pouvant être utilisée sur les routes droites ainsi qu'une méthode adaptée qui convient également sur les routes sinueuses. La différence est que la méthode classique compte les inversions du sens du volant par rapport à une position de référence fixe (correspondant au volant droit) alors que la méthode adaptée utilise une position de référence mobile. Nous proposons d'utiliser l'algorithme de la mesure du SRR adaptée aux routes sinueuse sur les mouvements de pédales, que nous appelons alors Pedal Reversal Rate (PRR). Cette adaptation peut se justifier sur plusieurs points :

1. Nous constatons d'une part que le SRR et le PRR portent sur des processus similaires. Pour les mouvements de volant, il y a d'une part des mouvements lents qui permettent de suivre la trajectoire souhaitée et des mouvements plus rapides qui permettent de corriger les erreurs par rapport à cette trajectoire (Donges, 1978). De façon similaire, on suppose qu'il y a pour les mouvements de pédales des mouvements lents qui permettent de rouler à la vitesse souhaitée. Il s'agit dans notre cas de la vitesse adoptée par le véhicule lièvre. Il y aurait également des mouvements de pédales visant à corriger les erreurs.
2. D'après Donges (1978), la correction des erreurs de trajectoire se baserait sur trois grandeurs : l'erreur de position latérale, le cap (angle entre l'axe longitudinal du véhicule et l'axiale de la route), et l'erreur du rayon de courbure. D'après les modèles de suivi de véhicules (e.g. Boer et al., 2005c), la correction des erreurs porterait sur l'erreur d'interdistance et sur la vitesse relative. On peut mettre en relation le cap et l'erreur d'interdistance. En effet, une modification temporaire de l'angle du volant conduit à modifier le cap, et une modification temporaire de la position de la pédale

d'accélérateur conduit à modifier l'interdistance. Il existe le même type de relation entre l'erreur du rayon de courbure et la vitesse relative qui correspondent respectivement à une modification permanente de l'angle du volant et à une modification permanente de la position de la pédale d'accélérateur.

3. La mesure du SRR porte sur la fréquence des mouvements de correction d'erreurs et il en est de même pour plusieurs autres mesures de la charge mentale allouée au contrôle de trajectoire. Il existe donc un lien entre la charge mentale et la fréquence des mouvements de correction d'erreurs sur le volant. Il n'y a pas *a priori* de raison de penser que ce n'est pas le cas pour les mouvements de pédales. Nous supposons donc que la fréquence des mouvements de pédales de correction d'erreurs nous renseigne sur la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle.
4. Contrairement aux points précédents, celui-ci ne vise pas à souligner une similarité mais une différence entre les mouvements de volant et de pédales. Cette différence est l'inertie du véhicule. La réaction du véhicule à un mouvement de volant est rapide alors qu'elle est plus lente pour les mouvements de pédales.

Le contrôle de l'intervalle se fait en appuyant sur la pédale d'accélération mais également sur la pédale de frein lorsque le conducteur souhaite décélérer de façon importante. Pour tenir compte des appuis sur ces deux pédales, nous avons utilisé un formalisme permettant de coder les deux informations. Les appuis sur la pédale d'accélération ont été codés de façon positive et les appuis sur la pédale de frein de façon négative, en partant du principe que le conducteur n'appuie jamais sur les deux pédales en même temps. Les appuis sur les pédales d'accélérateur et de frein sont initialement codés entre 0 lorsque la pédale est relâchée et 255 lorsqu'elle est appuyée à fond. Nous obtenons après fusion des deux informations une valeur comprise entre -255 pour le freinage maximal et +255 pour l'accélération maximale ; la valeur 0 correspondant aux deux pédales relâchées.

Le calcul du SRR suppose de choisir un seuil au-delà duquel le changement de sens du volant est pris en compte (McLean & Hoffmann, 1975). Nous avons donc fait de même pour le calcul du PRR. Le graphique de gauche de la Figure 44 présente le PRR en fonction du seuil choisi, et le graphique de droite présente le rapport entre le PRR en condition de brouillard et le PRR par temps clair en fonction du seuil. Plus le seuil est élevé et moins il y a d'inversions prises en compte, ce qui rend la mesure moins fiable. Pour les seuils supérieurs à 28, il y a des parcours pour lesquels aucune inversion n'a été prise en compte (condition de

vitesse constante). Il est donc souhaitable de rester bien en dessous de cette zone. On constate d'autre part que les valeurs présentées sont assez indépendantes du seuil. Nous avons donc choisi arbitrairement un seuil de 10, qui permet de satisfaire la seule contrainte énoncée. Les autres résultats et figures portant sur le PRR seront donc basés sur un seuil de 10.

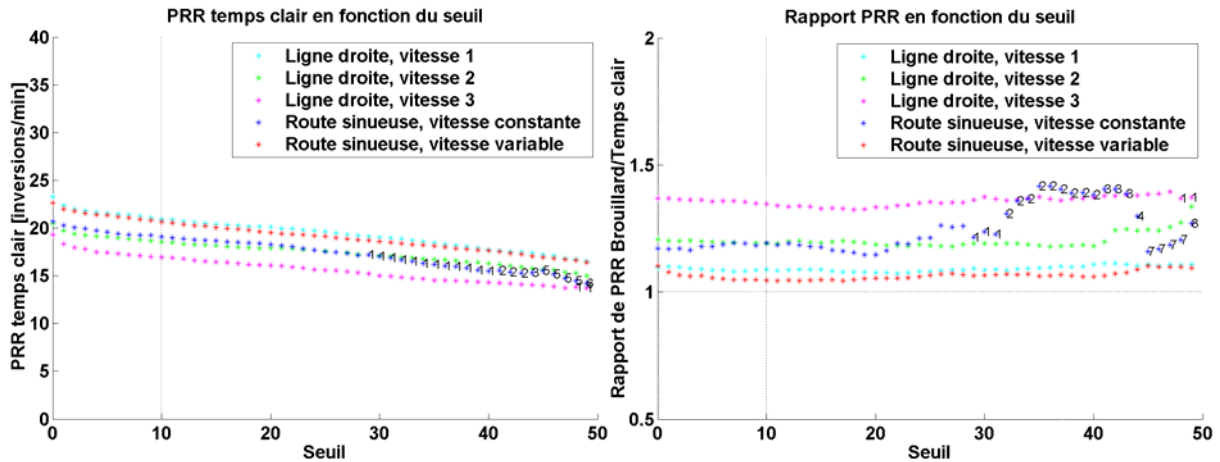


Figure 44 : Gauche : PRR (Pedal Reversal Rate) en fonction du seuil, pour les cinq conditions de vitesse par temps clair. Droite : Rapport entre le PRR par temps de brouillard et le PRR par temps clair en fonction du seuil, pour les cinq conditions de vitesse. Pour les seuils les plus élevés, il arrive qu'aucune inversion du sens du mouvement des pédales ne soit mesurée (PRR=0). Lorsque c'est le cas, les participants ne sont pas pris en compte, et un nombre noir indique à côté du point le nombre de participants n'ayant pas été pris en compte. La barre pointillée verticale représente le seuil qui a été choisi : 10.

3.2.2 Résultats concernant le Pedal Reversal Rate

La Figure 45 présentent le PRR en fonction de l'interdistance et de la condition de visibilité, pour les trois conditions de vitesses séparées. Pour avoir une vision plus claire, nous avons rassemblé les données de ces trois conditions de vitesse dans un même graphique (Figure 46). Il semblerait d'une part que le PRR soit plus élevé en condition de brouillard que par temps clair et d'autre part que l'interdistance n'ait pas le même effet sur le PRR pour ces deux conditions de visibilité.

Chapitre 4 : Contrôle de l'intervalle

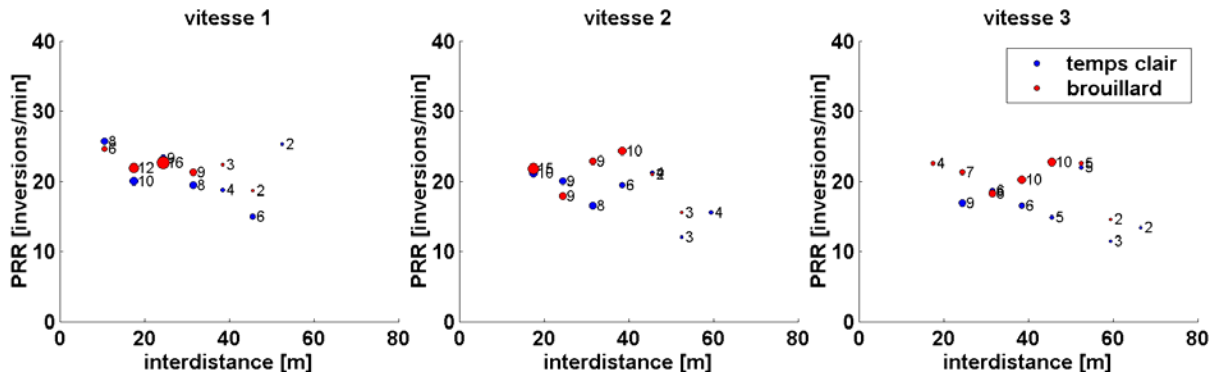


Figure 45 : PRR (Pedal Reversal Rate) en fonction de l'interdistance moyenne (m) et de la condition de visibilité. Les graphiques de gauche à droite correspondent respectivement aux vitesses moyennes de 12.8, 16, et 21.3 m/s. Les points correspondent à des regroupements de participants qui adoptent des intervalles proches (par tranches de 7 m). La taille des points dépend du nombre de participants qu'ils représentent (nombres indiqués en noir).

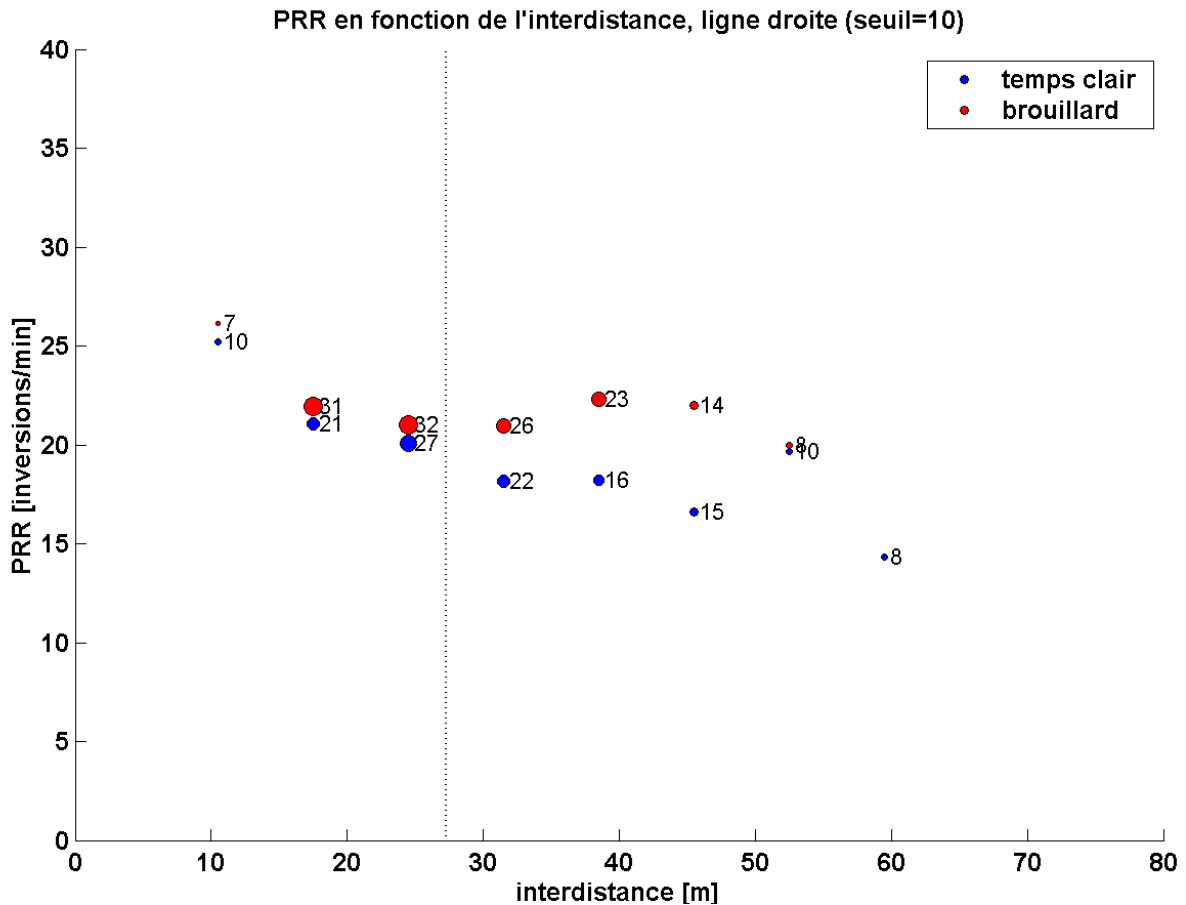


Figure 46 : PRR (Pedal Reversal Rate) en fonction de l'interdistance moyenne (m) et de la condition de visibilité, pour les trois conditions vitesses confondues. Les points correspondent à des regroupements de participants qui adoptent des intervalles proches (par tranches de 7 m). La taille des points dépend du nombre de participants qu'ils représentent (nombres indiqués en noir). La ligne pointillée verticale (à 27.3 m) délimite les gammes d'interdistances pour lesquelles le brouillard augmente (à droite) ou n'augmente pas (à gauche) le seuil de perception du mouvement relatif.

Chapitre 4 : Contrôle de l'intervalle

Pour savoir si les tendances apparaissant sur ces figures sont significatives, nous avons réalisé une analyse de variance factorielle sur le PRR pour les trois conditions de ligne droite confondues. Les variables catégorielles sont la condition de visibilité (2) et la gamme d'interdistances (2). Les interdistances ont été décomposées en deux catégories : celles inférieures et celles supérieures à 27.3 m. Cette valeur est la moyenne de 22.6 et de 32 m qui délimitent respectivement les gammes d'interdistances pour lesquelles le brouillard n'augmente pas (à gauche) ou augmente (à droite) le seuil de perception du mouvement relatif. L'interdistance de 27.3 m correspond ainsi au milieu de la zone de transition observée lors de l'expérience précédente.

Les résultats montrent un effet principal de la condition de visibilité ($F(1,284)=7.56$; $p<.01$) (Figure 47-gauche) avec un PRR plus élevé en condition de brouillard ($m=21.6$; $\sigma=7.18$) qu'en condition de temps clair ($m=18.8$; $\sigma=6.97$). Il y a également un effet principal de la gamme d'interdistances ($F(2,284)=10.4$; $p<.0025$), avec un PRR plus élevé pour les interdistances courtes ($m=21.8$; $\sigma=6.3$) que pour les interdistances longues ($m=18.9$; $\sigma=7.6$) (Figure 47-droite).

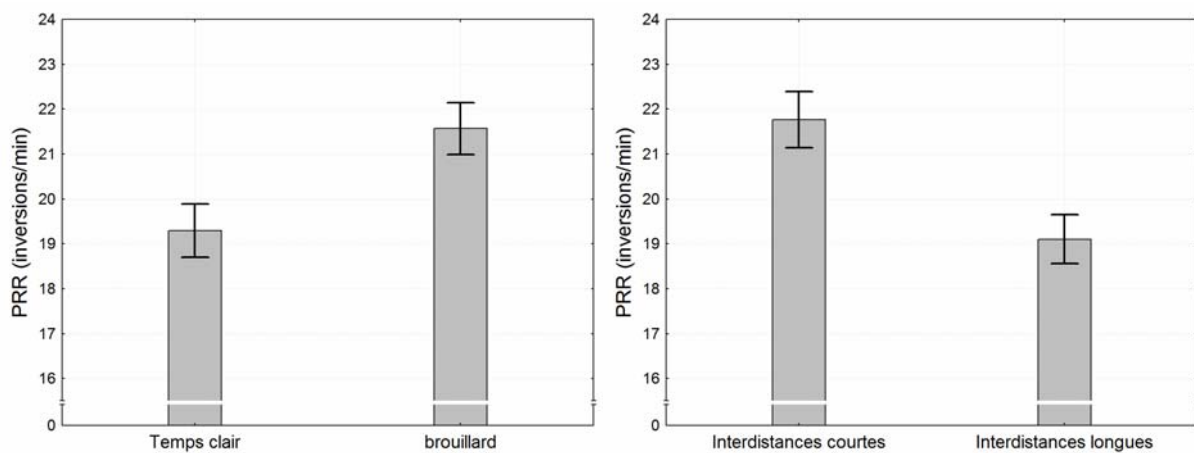


Figure 47 : *Gauche* : PRR (Pedal Reversal Rate) en fonction de la condition de visibilité. *Droite* : PRR en fonction de la gamme d'interdistances. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

L'analyse fait enfin apparaître une interaction entre la condition de visibilité et la gamme d'interdistances ($F(2,284)=4.74$; $p<.05$). Cette interaction va dans le sens d'une réduction du PRR lorsque l'intervalle augmente par temps clair, mais pas en condition de brouillard (Figure 48). Les tests post-hoc montrent que le PRR est significativement plus bas pour les interdistances longues par temps clair que pour les trois autres conditions ($p<.0005$). Les moyennes et écarts-types sont les suivants : temps clair-interdistances courtes : $m=21.5$,

$\sigma=6.24$; temps clair-interdistances longues : $m=17.1$, $\sigma=6.88$; brouillard-interdistances courtes : $m=22$, $\sigma=6.38$; brouillard-interdistances longues : $m=21.1$, $\sigma=7.87$.

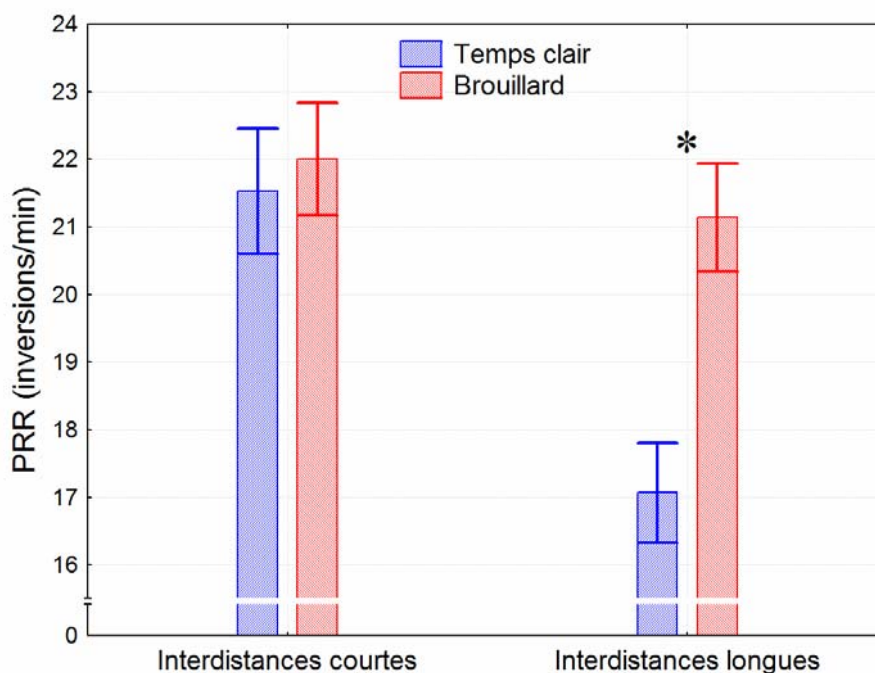


Figure 48 : PRR (Pedal Reversal Rate) en fonction de la gamme d'interdistances et de la condition de visibilité. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls.

Ces résultats montrent comme nous l'attendions que le PPR est plus élevé en condition de brouillard que par temps clair pour les intervalles où il avait été observé une augmentation du seuil de perception avec le brouillard. Ils montrent plus précisément que par temps clair, le PPR diminue lorsque l'intervalle augmente, alors que sa valeur reste élevée en condition de brouillard. Enfin, on constate sur la Figure 46 que l'interdistance à partir de laquelle le PPR augmente avec le brouillard correspond à l'interdistance à partir de laquelle le brouillard augmente le seuil de perception du mouvement relatif.

3.2.3 Amplitude maximale des mouvements de pédales

Nous venons de voir que le PPR montre des résultats concluants. Nous allons maintenant nous intéresser à la seconde mesure proposée pour connaître la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle : l'amplitude maximale des mouvements de pédales. Nous nous inspirons de l'approche de Boer et Ward (2003) qui considèrent que l'amplitude de la réponse à une violation des marges de sécurité représente l'effort. Ils créent ainsi une mesure basée sur l'amplitude maximale des mouvements de volant permettant de connaître l'effort que font les

conducteurs pour contrôler la trajectoire. Nous avons transposé la démarche de Boer et Ward (2003) afin de mesurer la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle à travers l'amplitude des mouvements de pédales. Dans ce cas, il ne s'agirait pas uniquement des réactions aux violations de marges de sécurité mais plutôt des sorties de la fourchette de tolérance décrite par Boer (1999a). Pour répondre à cette question nous pouvons nous référer au modèle de Boer et al. (2005c). Dans ce modèle, les coefficients C_0 et K_0 sont d'autant plus élevés que les mouvements de pédales visant à corriger les erreurs sont de grande amplitude. Or, nous avons vu que l'effort est d'autant plus grand que les coefficients C_0 et K_0 sont élevés, ce qui nous amène à penser que l'amplitude des mouvements de pédales représente l'effort fait pour contrôler l'intervalle, i.e. la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle. La mesure que nous avons utilisée porte plus précisément sur les plus grands mouvements de pédales, ce qui permet de se focaliser sur les instants où les participants font le plus d'efforts pour corriger les erreurs.

Pour calculer l'amplitude maximale des mouvements de pédales, nous avons utilisé comme précédemment le formalisme qui code les appuis sur l'accélérateur de façon positive et les appuis sur le frein de façon négative. L'amplitude maximale est alors définie par la différence entre le 95^{ème} et le 5^{ème} percentile sur la zone d'étude considérée. C'est justement parce que la mesure est basée sur les 5^{ème} et 95^{ème} percentiles, qu'elle nous renseigne sur les plus grands efforts. La Figure 49 présente l'amplitude maximale des mouvements de pédales en fonction de l'interdistance et de la condition de visibilité pour les trois conditions de vitesses séparées ; et la Figure 50 correspond aux trois conditions de visibilité confondues. Il semblerait d'une part que l'amplitude maximale soit plus élevée en condition de brouillard que par temps clair et d'autre part que l'interdistance n'ait pas le même effet pour ces deux conditions de visibilité. On constate qu'en condition de brouillard, l'amplitude maximale augmente avec l'interdistance pour les grandes interdistances, au moins en ce qui concerne la vitesse élevée.

Chapitre 4 : Contrôle de l'intervalle

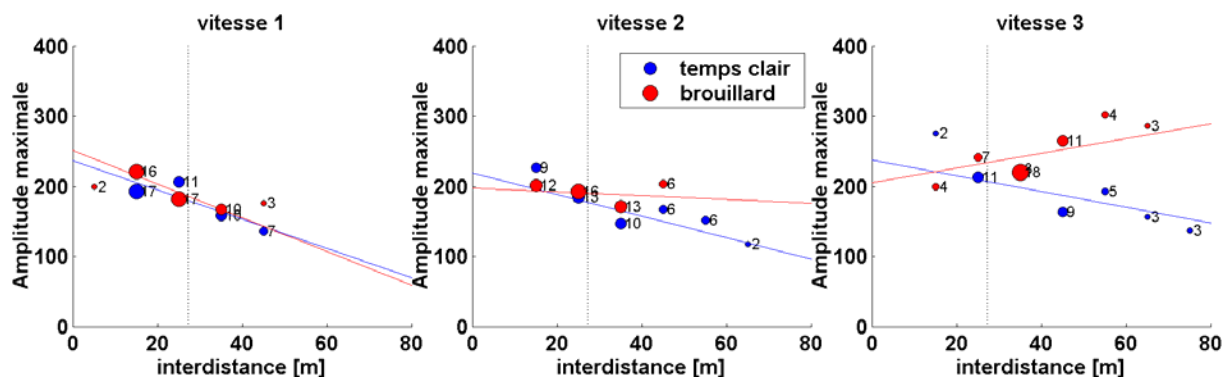


Figure 49 : Amplitude maximale des mouvements de pédales (95^{ème} – 5^{ème} percentile) en fonction de l'interdistance médiane (m). Les graphiques de gauche à droite correspondent respectivement aux vitesses moyennes de 12.8, 16, et 21.3 m/s. Les points correspondent à des regroupements de participants qui adoptent des interdistances proches (par tranches de 10 m). Le nombre de participants représentés par chaque pont est indiqué en noir.

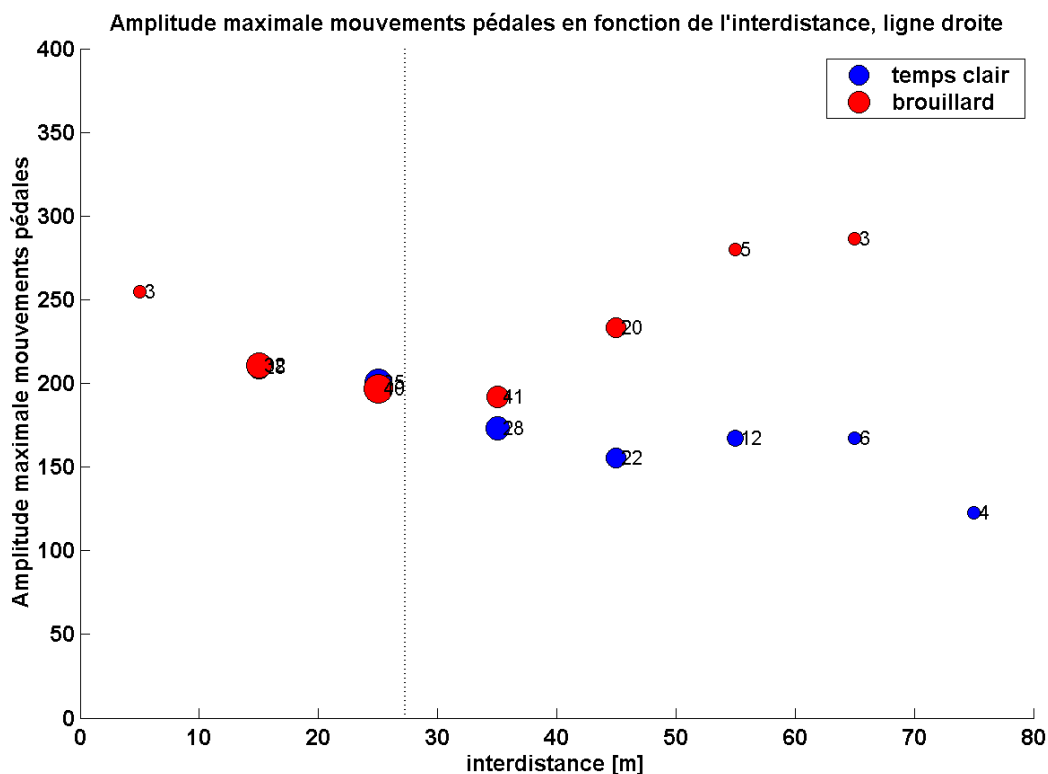


Figure 50 : Amplitude maximale des mouvements de pédales (95^{ème} – 5^{ème} percentile) en fonction de l'interdistance médiane (m), pour les trois conditions de vitesse confondues. Les points correspondent à des regroupements de participants qui adoptent des interdistances proches (par tranches de 10 m). Le nombre de participants représentés par chaque pont est indiqué en noir.

Pour savoir si les tendances observées sont significatives, nous avons réalisé une analyse de variance factorielle sur l'amplitude maximale des mouvements de pédales. Puisque l'amplitude des mouvements de pédales semble dépendre de la condition de vitesse, nous

avons tenu compte de cette variable. Les variables catégorielles sont la condition de visibilité (2), la condition de vitesse (3) et la gamme d'interdistances (2). Les interdistances ont été décomposées en deux catégories : celles inférieures et celles supérieures à 27.3 m, i.e. celles pour lesquelles le brouillard n'augmente pas et celles pour lesquelles le brouillard augmente le seuil de perception du mouvement relatif.

Les résultats montrent un effet principal de la condition de visibilité ($F(1,25335)=4.82$; $p<.05$) avec une amplitude maximale plus élevée en condition de brouillard ($m=209$; $\sigma=79.7$) qu'en condition de temps clair ($m=179$; $\sigma=72.5$) (Figure 51-gauche). Il y a également un effet principal de la condition de vitesse ($F(2,35870)=6.82$; $p<.0025$) dans le sens où l'amplitude augmente avec la vitesse (Figure 51-droite). Les tests post-hoc montrent ($p<.025$) que l'amplitude est plus élevée pour la vitesse la plus élevée ($m=214$; $\sigma=86.3$) que pour les deux autres conditions de vitesse (vitesse 1 : $m=188$; $\sigma=71.1$; vitesse 2 : $m=181$; $\sigma=71.1$). Il y a aussi un effet principal de la gamme d'interdistances ($F(1,70386)=13.4$; $p<.0005$), avec une amplitude maximale plus élevée pour les interdistances courtes ($m=208$; $\sigma=70$) que pour les interdistances longues ($m=184$; $\sigma=81.5$) (Figure 52-gauche).

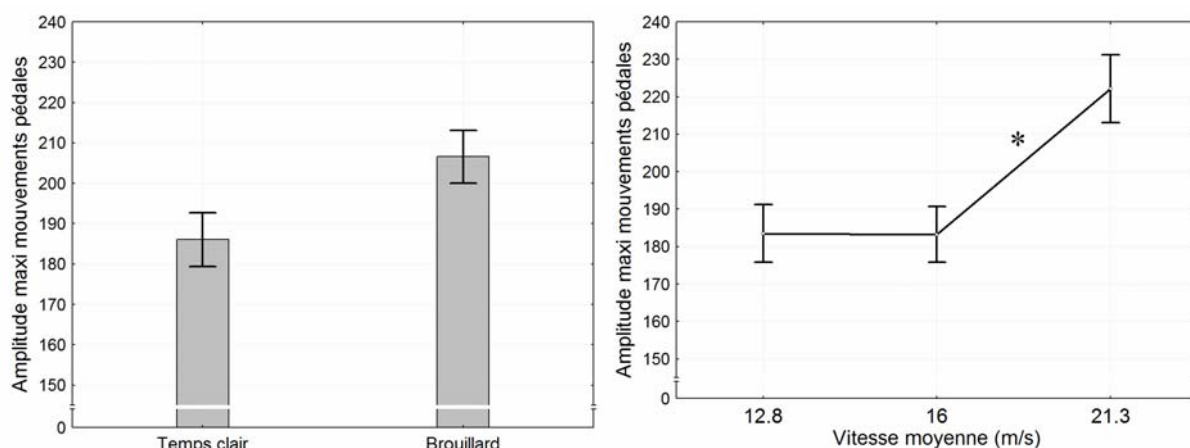


Figure 51 : Gauche : Amplitude maximale des mouvements de pédales en fonction de la condition de visibilité. Droite : Amplitude maximale des mouvements de pédales en fonction de la condition de vitesse. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

L'analyse fait enfin apparaître une interaction entre la condition de visibilité et la gamme d'interdistances ($F(1,28622)=5.45$; $p<.025$). Cette interaction va dans le sens d'une réduction de l'amplitude des mouvements de pédales lorsque l'intervalle augmente par temps clair, mais pas en condition de brouillard (Figure 52-droite). Les tests post-hoc montrent que l'amplitude est significativement plus basse pour les interdistances longues par temps clair que pour les

trois autres conditions ($p < .00025$). Les moyennes et écarts-types sont les suivants : temps clair-interdistances courtes : $m=209$, $\sigma=65.8$; temps clair-interdistances longues : $m=160$, $\sigma=70.2$; brouillard-interdistances courtes : $m=207$, $\sigma=73.6$; brouillard-interdistances longues : $m=212$, $\sigma=85.3$. En revanche, il n'y a pas d'interaction entre la condition de visibilité, la condition de vitesse et la gamme d'interdistances.

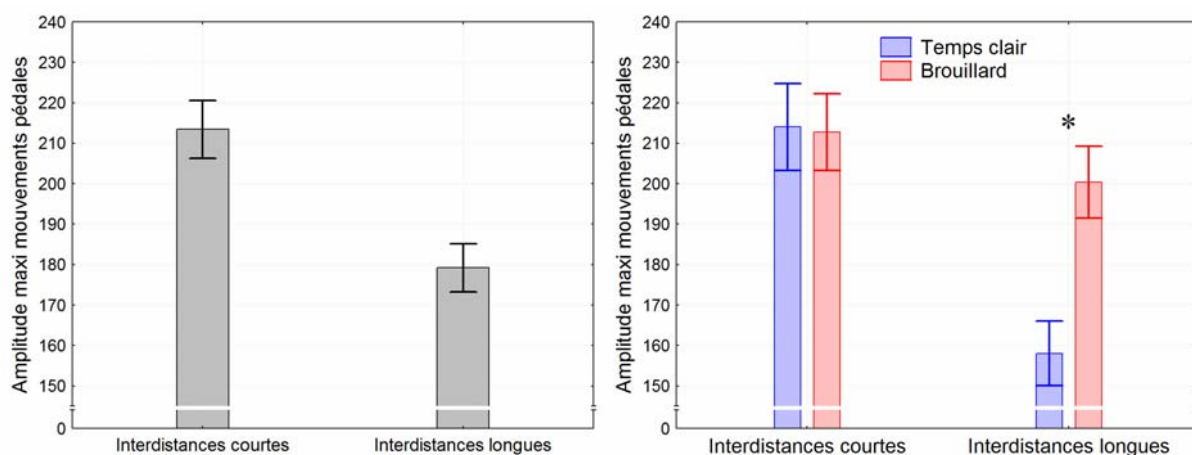


Figure 52 : Gauche : Amplitude maximale des mouvements de pédales en fonction de la gamme d'interdistances. Droite : Amplitude maximale des mouvements de pédales en fonction de la gamme d'interdistances et de la condition de visibilité. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls.

3.2.4 Discussion concernant la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle

En tant que mesure de la charge mentale, l'amplitude maximale des mouvements de pédales confirme les résultats obtenus avec le PRR. Ces deux mesures indiquent en effet une charge mentale plus importante en condition de brouillard que par temps clair pour les grandes interdistances. Il semble cependant y avoir une différence quant à l'interdistance à partir de laquelle les deux conditions de visibilité diffèrent. L'interdistance à partir de laquelle le PRR augmente avec le brouillard correspond à l'interdistance à partir de laquelle le brouillard augmente le seuil de perception du mouvement relatif. Il semble en revanche que l'effet du brouillard sur l'amplitude des mouvements de pédales n'apparaisse que pour des interdistances plus longues (de l'ordre de 40 m) (comparaison de la Figure 46 avec la Figure 50). Suite à ce constat, nous proposons l'explication suivante : le PRR permettrait de mesurer l'effort fait par les participants pour rester dans la fourchette de tolérance qu'ils se sont fixés alors que l'amplitude maximale nous renseigne plutôt sur les plus grands efforts visant à corriger les situations en dehors de cette fourchette de tolérance. Il y aurait donc en condition de brouillard, une dégradation progressive du contrôle de l'intervalle lorsque l'intervalle

augmente, se caractérisant d'abord par une augmentation de la charge mentale, i.e. des corrections d'erreurs plus fréquentes, puis par des corrections de plus grande amplitude. D'autre part, la plus grande amplitude des mouvements de pédales pour la vitesse élevée peut être expliquée par la capacité d'accélération des véhicules qui diminue lorsque la vitesse augmente, contraignant ainsi les participants à accélérer d'autant plus fort que la vitesse est élevée.

3.3 Intervalle de suivi

Nous avons vu que la charge mentale est plus élevée en condition de brouillard que par temps clair pour les grands intervalles. Pour savoir si l'élévation de la charge mentale a un effet sur les intervalles adoptés par les participants, nous avons cherché à comparer les intervalles pratiqués par temps clair et en condition de brouillard. Comme précédemment, nous nous sommes intéressés à l'interdistance plutôt qu'au TIV.

3.3.1 Fonction de distribution de probabilité

Nous avons tracé la fonction de distribution de probabilité (PDF) de l'interdistance pour les trois conditions de vitesse (Figure 53). Ce type de tracé permet de savoir quels sont les intervalles auxquels les participants ont passé le plus de temps. On constate un resserrement des interdistances pratiquées. Pour les vitesses 1 et 2, il s'agit principalement d'une réduction des intervalles les plus longs (>40 m). Ce resserrement conduit à augmenter la proportion des intervalles compris entre 15 et 30-35 m. Pour la vitesse 3, il s'agit plutôt d'une réduction des interdistances supérieures à 60 m, conduisant à augmenter la proportion des interdistances comprises entre 15 et 60 m et plus particulièrement celles comprises entre 30 et 50 m.

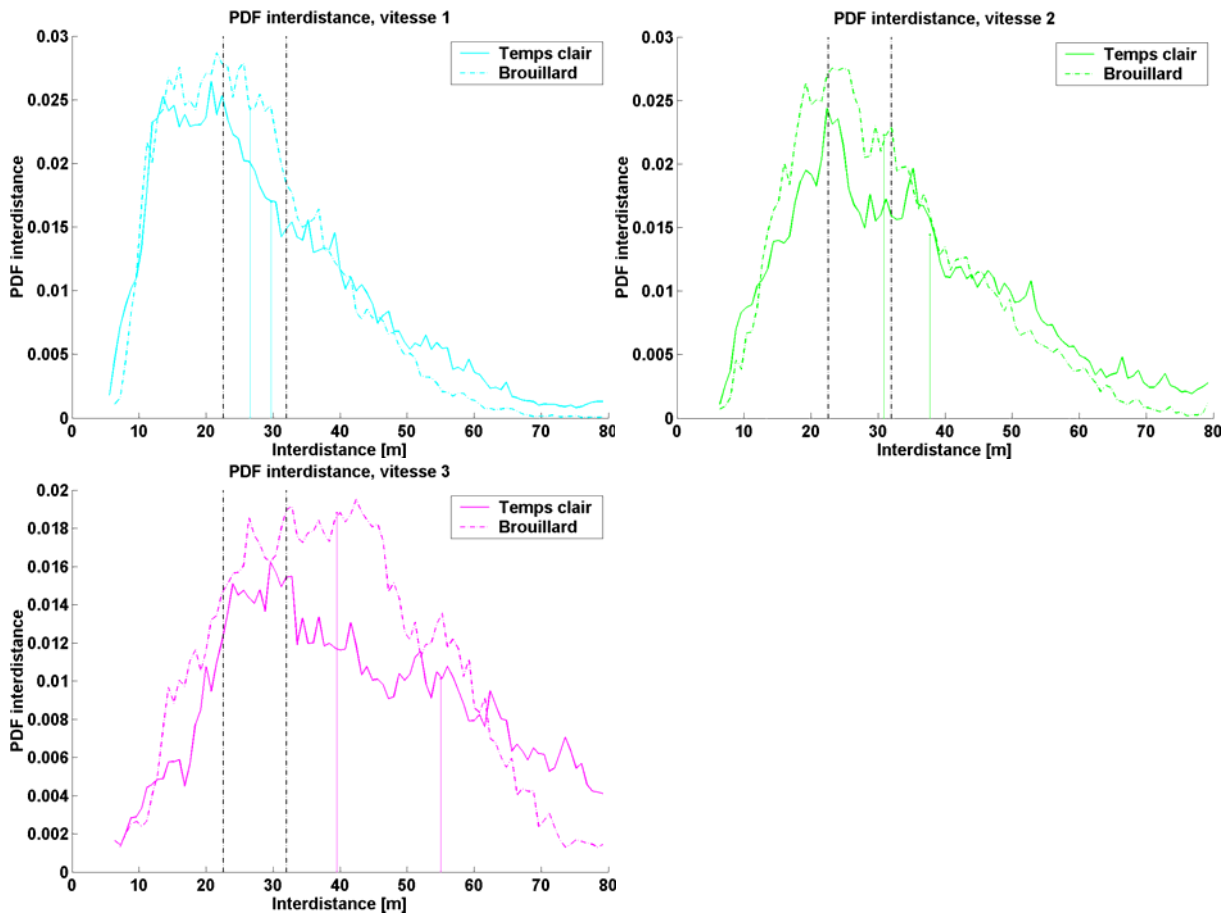


Figure 53 : Fonction de distribution de probabilités (PDF) de l'interdistance pour les trois conditions de ligne droite. Les barres verticales en trait plein représentent la valeur moyenne de l'interdistance. Les deux lignes pointillées verticales délimitent les gammes d'interdistances pour lesquelles le brouillard augmente (à droite) ou n'augmente pas (à gauche) le seuil de perception du mouvement relatif.

3.3.2 Intervalles pratiqués de façon individuelle

Nous avons d'autre part cherché à connaître l'influence du brouillard sur l'intervalle pratiqué par les participants de façon individuelle. La Figure 54 présente la proportion des participants qui augmentent et de ceux qui réduisent l'intervalle de suivi en fonction de l'interdistance qu'ils ont adoptée par temps clair. Cette figure montre que les participants les plus éloignés par temps clair ont tendance à se rapprocher en condition de brouillard et que les participants les plus proches ont tendance à s'éloigner. Le brouillard entraîne donc une convergence des participants vers une zone centrale.

Chapitre 4 : Contrôle de l'intervalle

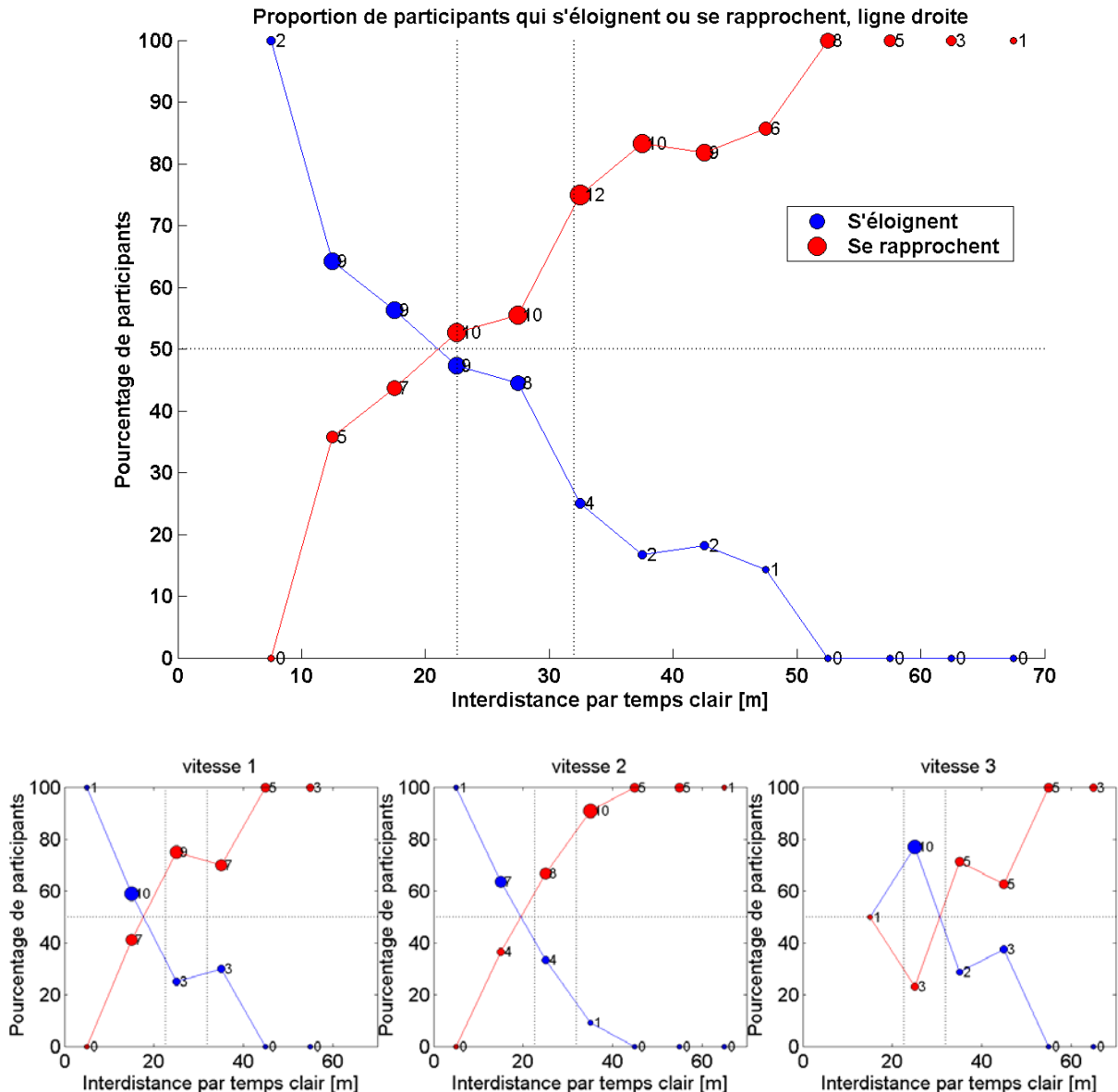


Figure 54 : Proportion des participants qui s'éloignent ou se rapprochent avec le brouillard en fonction de l'interdistance médiane par temps clair. Le graphique du haut correspond aux trois conditions de vitesses confondues, et les graphiques du bas de gauche à droite correspondent respectivement aux vitesses 1, 2, et 3. Les points correspondent à des regroupements de participants qui adoptent des intervalles proches par temps clair (par tranches de 5 m pour le graphique du haut, et par tranches de 10 m pour ceux du bas).

Pour connaître l'interdistance vers laquelle les participants convergent, nous avons ajusté des fonctions logistiques sur les données qui ont permis de construire ces graphiques. L'équation de la fonction logistique est la suivante :

$$y = \frac{1}{1 + e^{\frac{A-x}{B}}}$$

Chapitre 4 : Contrôle de l'intervalle

où la proportion de participants (y) est une fonction de l'interdistance par temps clair (x) et où les paramètres à ajuster sont A et B. Le paramètre A correspond à l'interdistance pour laquelle la proportion de participants est de 50% et le paramètre B est inversement proportionnel à la pente de la courbe. L'interdistance vers laquelle les participants ont tendance à converger est donc donnée par le paramètre A. Le tableau ci-dessous présente les paramètres ajustés. On constate que les participants convergent respectivement vers des interdistances de 18.1, 20.6, et 33.6 m pour les trois conditions de vitesse, et vers 21.4 m pour les trois conditions confondues.

| Condition expérimentale | Paramètre A | Paramètre B |
|---------------------------|-------------|-------------|
| Vitesse 1 | 18.1 | 8.84 |
| Vitesse 2 | 20.5 | 5.45 |
| Vitesse 3 | 33.6 | 11.2 |
| Trois vitesses confondues | 21.4 | 11.5 |

Tableau 6 : Paramètres A et B des fonctions logistiques qui ont été ajustés.

3.3.3 Test d'une hypothèse spécifique

Les résultats de l'expérience portant sur la perception du mouvement relatif nous avaient amené à émettre une hypothèse très précise. D'après cette hypothèse, les participants dont le TIV préférentiel correspond à une interdistance de l'ordre de 32 m réduiraient leur intervalle de suivi en condition de brouillard, par rapport à la condition de visibilité normale. En revanche, les participants ne correspondant pas à ce critère adopteraient le même intervalle en condition de brouillard que par temps clair.

Le point clé permettant de tester cette hypothèse est que le TIV préférentiel correspond à des interdistances différentes selon la vitesse à laquelle le véhicule roule. L'interdistance de 32 m, qui nous intéresse, correspond donc à des TIV différents selon la vitesse propre. Ce devrait donc être des participants différents qui réduisent leur intervalle pour les différentes conditions de vitesse. Lorsque la vitesse est de 12.8 m/s, un TIV de 2.5 s correspond à une interdistance de 32 m. On s'attend donc à ce que ce soit les participants ayant un TIV préférentiel de l'ordre de 2.5 s qui réduisent leur intervalle en condition de brouillard. De la même façon, ce seraient les participants ayant un TIV préférentiel de l'ordre de 2 s qui réduiraient leur intervalle à 16 m/s, et ceux ayant un TIV préférentiel de l'ordre de 1.5 s

lorsque la vitesse est 21.3 m/s. La Figure 55 représente notre hypothèse de façon schématique. Nous supposons ici que l'intervalle adopté par temps clair correspond à l'intervalle préférentiel. On s'attend à ce que les intervalles adoptés en condition de brouillard soient similaires à ceux adoptés par temps clair, sauf dans la zone autour de 32 m. Dans cette zone, on s'attend à ce qu'il y ait une réduction des intervalles, en particulier pour les interdistances les plus proches de 32 m. Le lecteur peut se demander pourquoi les effets sont uniquement attendus autour de 32 m alors que la transition entre la gamme d'interdistance ne montrant pas d'effet du brouillard sur le seuil de perception du mouvement et la gamme d'interdistance faisant apparaître un effet du brouillard est comprise entre 22.6 et 32 m. La réponse est simplement que c'est lorsque l'interdistance est proche de 32 m, qu'une réduction donnée de l'intervalle a le plus grand bénéfice sur la perception du mouvement relatif. Le seuil est en effet élevé pour l'interdistance de 32 m et une réduction de l'intervalle s'accompagnerait d'une réduction du seuil.

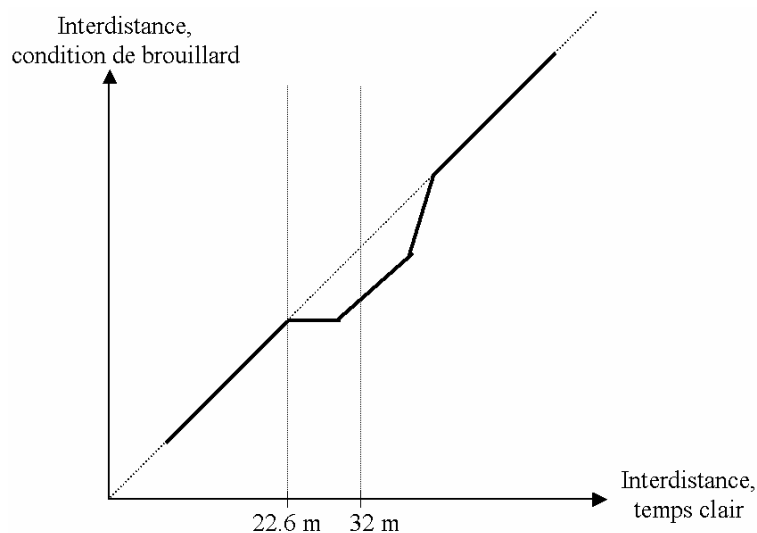


Figure 55 : Représentation schématique de notre hypothèse : Interdistance en condition de brouillard en fonction de l'interdistance par temps clair. Les deux lignes pointillées verticales délimitent les gammes d'interdistances pour lesquelles le brouillard augmente (à droite) ou n'augmente pas (à gauche) le seuil de perception du mouvement relatif. La barre oblique pointillée a une pente de 1 (valeurs en ordonnée égales aux valeurs en abscisse).

La Figure 56 présente l'interdistance adoptée en condition de brouillard en fonction de l'interdistance adoptée par temps clair, pour les trois conditions de vitesses séparées. Pour avoir une vision plus claire, nous avons rassemblé les données de ces trois conditions de vitesse dans un même graphique (Figure 57). On constate que les pentes des droites de régression sont nettement inférieures à un. Il apparaît ainsi une réduction des intervalles avec

Chapitre 4 : Contrôle de l'intervalle

le brouillard pour les plus grandes interdistances. Il est possible qu'il y ait au contraire une augmentation des intervalles pour les plus courtes interdistances. Cela constitue une zone de convergence, comme nous l'avons vu précédemment. D'après les droites de régression, la convergence se ferait respectivement vers 21.7, 22.1, et 33 m pour les vitesses de 12.8, 16, et 21.3 m/s.

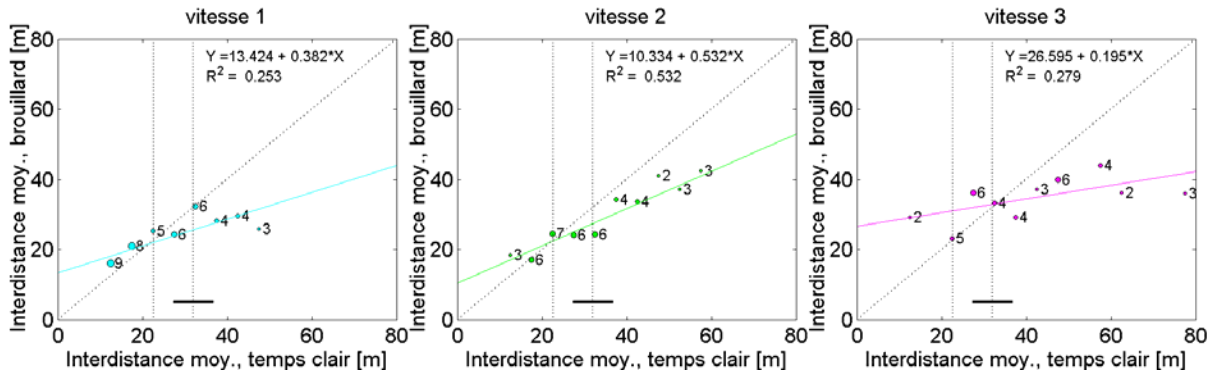


Figure 56 : Interdistances moyennes en condition de brouillard (m) en fonction de l'interdistances moyennes par temps clair (m). Les graphiques de gauche à droite correspondent respectivement aux vitesses moyennes de 12.8, 16, et 21.3 m/s. Les points correspondent à des regroupements de participants qui adoptent des intervalles proches (par tranches de 5 m). Les deux lignes pointillées verticales délimitent les gammes d'interdistances pour lesquelles le brouillard augmente (à droite) ou n'augmente pas (à gauche) le seuil de perception du mouvement relatif. La barre oblique pointillée a une pente de 1. Le segment horizontal noir matérialise la zone sur laquelle nous attendons une réduction des intervalles. Les coordonnées des droites de régressions sont indiquées sur chaque graphique.

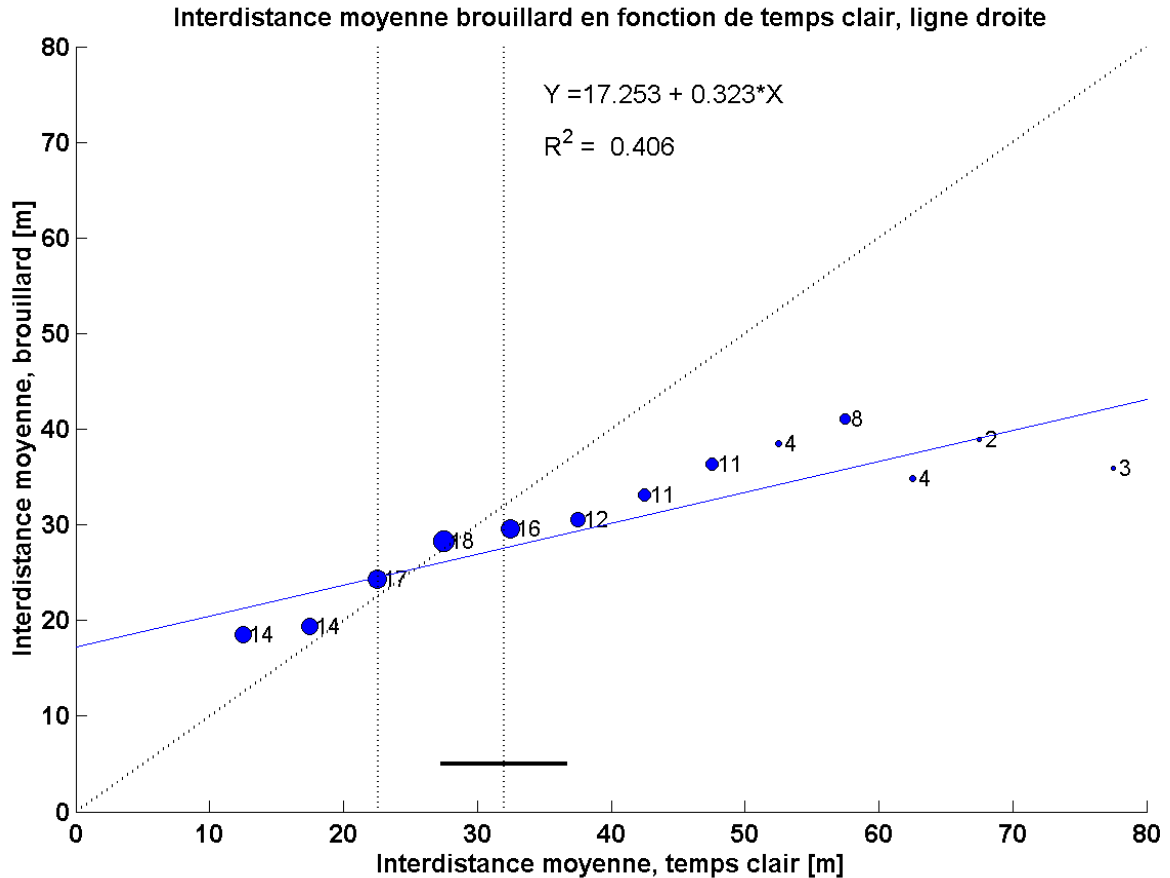


Figure 57 : Interdistance moyenne en condition de brouillard (m) en fonction de l'interdistance moyenne par temps clair (m), pour les trois conditions de ligne droite confondues. Les points correspondent à des regroupements de participants qui adoptent des intervalles proches (par tranches de 5 m). Les deux lignes pointillées verticales délimitent les gammes d'interdistances pour lesquelles le brouillard augmente (à droite) ou n'augmente pas (à gauche) le seuil de perception du mouvement relatif. La barre oblique pointillée a une pente de 1. Le segment horizontal noir matérialise la zone sur laquelle nous attendons une réduction des intervalles. Les coordonnées des droites de régressions sont indiquées sur le graphique.

3.3.4 Discussion concernant les intervalles de suivi

Nous pouvons proposer quatre stratégies qui expliqueraient chacune partiellement le phénomène de convergence ayant été observé. La combinaison de ces stratégies fournirait alors une explication de l'ensemble des résultats sur les intervalles adoptés.

1. L'intervalle adopté dépend des possibilités d'anticipation. Les résultats suggèrent que l'impossibilité d'anticiper en condition de brouillard amène les participants ayant les intervalles les plus courts par temps clair à s'éloigner du véhicule lièvre en condition de brouillard (van der Hulst, 1999 ; van der Hulst et al., 1998).

2. L'intervalle adopté dépend également de la charge mentale. Nous avons en effet vu que la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle est plus importante en condition de brouillard que par temps clair pour les interdistances faisant apparaître une augmentation du seuil de perception du mouvement en condition de brouillard. Les résultats suggèrent que les participants adoptant par temps clair des interdistances pour lesquelles le brouillard augmente le seuil de perception du mouvement, cherchent en condition de brouillard à réduire leur intervalle de façon à maintenir le même niveau de charge mentale que par temps clair. L'adoption de cette stratégie pourrait expliquer l'augmentation de la proportion des intervalles compris entre 15 et 30-35 m pour les vitesses 1 et 2 (Figure 53).
3. L'intervalle adopté dépend aussi du TIV minimum acceptable par les participants. Ce TIV serait d'environ 1.6 s d'après Malaterre (1994), ce qui correspond respectivement à des interdistances de 20.5, 25.6, et 34.1 m pour les trois vitesses étudiées. Il apparaît clairement que pour la vitesse élevée, l'interdistance correspondant au TIV minimum fait partie de la gamme pour laquelle le brouillard augmente le seuil de perception du mouvement.
4. Enfin, la nécessité de garder le véhicule lièvre en vue amène les participants les plus éloignés par temps clair à s'en rapprocher lorsqu'il y a du brouillard. Les participants pourraient ainsi être amenés à réduire l'intervalle en particulier pour la vitesse élevée, pour laquelle les participants passent par temps clair 18% du temps de conduite au-delà de la distance de visibilité des feux (77.2 m).

Ces explications nous amènent au constat que les participants sont contraints d'un côté par la distance de visibilité limitée des feux qui les empêchent d'adopter des intervalles aussi longs que par temps clair. Ils sont contraints d'un autre côté par le TIV minimum acceptable qui les pousse à adopter des interdistances d'autant plus grandes que la vitesse est élevée. La marge de manœuvre concernant le contrôle de l'intervalle en condition de brouillard est donc d'autant plus réduite que la vitesse est élevée. Les participants sont ainsi amenés pour la vitesse la plus élevée, à conduire dans une zone où la charge mentale est plus élevée que par temps clair.

Nous avons par ailleurs cherché à tester une hypothèse spécifique, basée sur le seuil de perception du mouvement relatif (cf. chapitre 3). On constate (Figure 57) que les participants qui réduisent leur intervalle en condition de brouillard ne sont pas seulement ceux dont

l'intervalle par temps clair était proche de 32 m, comme nous l'avions supposé. Il apparaît plutôt un phénomène général de convergence vers les interdistances de 20 à 25 m pour les vitesses 1 et 2. Nous pensons que le phénomène attendu est bien présent mais qu'il est masqué par les autres phénomènes qui viennent d'être évoqués : il y aurait d'une part une augmentation des intervalles les plus courts pour compenser le manque d'anticipation et d'autre part une réduction des plus grands intervalles afin de garder le véhicule lièvre en vue.

La question qui se pose, est de savoir quelle est l'influence respective de notre hypothèse initiale et de la nécessité de garder le véhicule lièvre en vue, en ce qui concerne la réduction des grands intervalles. Nous avons formulé l'hypothèse initiale en disant que les participants adoptant une interdistance d'environ 32 m par temps clair réduiraient leur intervalle en condition de brouillard. Il n'est cependant pas exclu que les participants adoptant des interdistances plus longues par temps clair cherchent également à réduire leur intervalle en condition de brouillard. Cette réduction d'intervalle leur permettrait de maintenir le seuil de perception du mouvement relatif au même niveau que par temps clair, par l'effet de l'interdistance sur le seuil. En tenant compte de cette dernière considération, il semble difficile de délimiter l'influence respective de l'augmentation du seuil de perception et de la nécessité de garder le véhicule lièvre en vue.

Nous supposons même que ces deux stratégies ont un effet combiné en ce qui concerne la réduction des grands intervalles. Nous avons vu que le brouillard augmente plus particulièrement le seuil de perception du mouvement relatif lorsqu'il s'agit de percevoir l'éloignement du véhicule suivi. Les participants ayant de grands intervalles auraient ainsi tendance à perdre le véhicule de vue. La réaction naturelle serait alors de s'en rapprocher pour le garder en vue plus facilement, expliquant ainsi la réduction des intervalles. Cet effet combiné des deux stratégies peut par ailleurs expliquer que les participants convergent vers les interdistances de 20-30 m en seulement quelques minutes de conduite. Il ne leur serait en effet pas nécessaire d'explorer toutes les gammes d'intervalles pour trouver celle qui convient le mieux.

4 Discussion concernant le contrôle de l'intervalle

4.1 Comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature

Nous expliquons les résultats de la présente expérience à travers quatre stratégies respectivement liées aux possibilités d'anticipation, à la charge mentale pour contrôler l'intervalle, au TIV minimum acceptable, et à la nécessité de garder le véhicule lièvre en vue. La stratégie par laquelle nous expliquons la réduction des plus grands intervalles en condition de brouillard repose sur la nécessité de garder le véhicule lièvre en vue. Parmi les expériences de suivi de véhicule en condition de brouillard précédemment menées sur simulateur, deux avaient effectivement mis cette stratégie en évidence (Broughton et al., 2007 ; Cavallo et al., 2007).

Par ailleurs, l'expérience menée par van der Hulst et al. (1998) était conçue de façon à mettre en avant la nécessité de réagir à l'environnement, et donc d'anticiper. Le circuit utilisé comportait des virages larges ainsi que des intersections ; et l'une des consignes données aux participants était de respecter la priorité à droite. On peut penser que cette mise en avant de la nécessité de réagir à l'environnement a amené les participants à augmenter leur intervalle en condition de brouillard, augmentant ainsi les possibilités d'anticipation. Cette augmentation de l'intervalle a été possible sans perdre le véhicule de vue puisque sa silhouette était visible jusqu'à 150 m (correspondant à un TIV de 6.75 s). Cette interprétation reposant sur les possibilités d'anticipation et la volonté de garder le véhicule lièvre en vue est compatible avec les résultats de Rosey et Espié (2007). Ils observent en effet une augmentation de l'intervalle en condition de brouillard dense (DVM=60 m) comparativement à la condition de temps clair, en particulier lorsque l'environnement routier correspond à celui d'une route secondaire où la nécessité de réagir à l'environnement est plus présente que sur autoroute. Ils observent par ailleurs des intervalles plus courts dans le brouillard très dense (DVM=30 m) que dans le brouillard dense (DVM=60 m), se justifiant par la volonté de garder le véhicule lièvre en vue.

Contrairement aux résultats qui viennent d'être présentés, ceux de Hogema et van der Horst (1994b) sont surprenants. Le TIV adopté par les participants est de l'ordre de deux secondes, indépendamment de la vitesse (5.5 à 27.8 m/s, i.e. 20 à 100 km/h) et de la densité du brouillard (DVM = 40 à 600 m). L'absence d'effet signifie qu'aucune des stratégies que nous avons présentées n'affecte le comportement des participants. Une explication possible

repose sur le comportement du véhicule lièvre. Nous avons vu que l'intervalle par rapport au véhicule lièvre était mesuré pendant des phases où ce dernier avait une vitesse constante. Or si le véhicule lièvre a une vitesse constante, la régulation de l'intervalle présente peu de difficultés. Il n'est alors pas nécessaire pour les participants, de se rapprocher du véhicule pour voir correctement sa silhouette et ainsi réduire la charge mentale. La vitesse constante du véhicule lièvre (pendant une durée donnée) pourrait donc expliquer pourquoi la stratégie reposant sur la charge mentale n'a pas amené les participants à se rapprocher d'avantage du véhicule suivi lorsque le brouillard était plus dense. Il suffisait en effet d'être suffisamment proche pour voir les feux du véhicule lièvre. Ce raisonnement tient également lorsqu'il s'agit d'expliquer pourquoi l'intervalle adopté est indépendant de la vitesse en condition de brouillard. Un intervalle de deux secondes représente effectivement une plus grande interdistance à grande vitesse, mais les participants n'ont pas de raison de se rapprocher du véhicule lièvre tant que cette interdistance leur permet de voir ses feux. Conformément à cette interprétation, nous verrons au chapitre 5 que la convergence des participants vers les interdistances de 20-25 m avec le brouillard apparaît moins nettement lorsque la vitesse du véhicule lièvre est constante (Figure 83, page 217). Ce phénomène de convergence peut donc être vu comme une adaptation des participants à la situation de brouillard et aux variations de vitesse du véhicule lièvre.

Une autre forme d'adaptation peut être vue à travers l'augmentation de la charge mentale pour les plus grands intervalles, où le brouillard augmente le seuil de perception du mouvement relatif. Cette augmentation de la charge mentale leur permet de maintenir le même niveau de performance en condition de brouillard et par temps clair. Contrairement à ces résultats, le modèle de Boer et al. (2007, 2008) qui prends en compte les seuils de perception du mouvement présentés au chapitre 3, montre une dégradation de la performance pour les grands intervalles. En effet, dans le modèle de Boer et al. (2007, 2008) la charge mentale est supposée constante. Ainsi lorsque le contrôle de l'intervalle devient plus difficile, c'est la performance qui se dégrade. Nous retrouvons ici la relation inverse qui existe entre la charge mentale et la performance.

4.2 Principaux résultats

Les résultats de l'expérience présentée au chapitre 3 ont montré que le seuil de perception du mouvement relatif est plus élevé en condition de brouillard que par temps clair pour les

interdistances supérieures à 32 m, par opposition à celles inférieures à 22 m (lorsque $DVM=32$ m). Nous avons alors fait l'hypothèse que la performance du contrôle de trajectoire, i.e. sa précision, serait dégradée en condition de brouillard pour ces interdistances. Or, les résultats montrent que ce n'est pas le cas. En revanche, on observe une augmentation de la charge mentale en condition de brouillard pour ces mêmes interdistances. On peut donc penser que les participants ont compensé l'augmentation du seuil de perception en augmentant leur charge mentale, permettant ainsi de maintenir la précision du contrôle de trajectoire au même niveau que par temps clair. De plus, les résultats de la présente expérience confirment notre hypothèse en montrant que les participants dont l'intervalle préférentiel ne permet pas de voir suffisamment la silhouette du véhicule lièvre en condition de brouillard, réduisent leur intervalle de façon à la voir correctement, leur permettant ainsi de réduire le seuil de perception du mouvement et la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle. Ce constat semble toutefois limité aux situations où le véhicule lièvre a une vitesse variable.

On constate par ailleurs que la stratégie visant à réduire l'intervalle pour diminuer la charge mentale, est l'une des quatre stratégies mises en évidence lors de cette expérience. Voici ces quatre stratégies, présentées par ordre de priorité croissante, tels qu'ils sont apparus lors de la présente expérience :

1. Les participants cherchent à s'éloigner du véhicule lièvre en condition de brouillard de façon à augmenter leurs possibilités d'anticipation (qui sont limitées par le brouillard).
2. Les participants cherchent à voir correctement la silhouette du véhicule lièvre afin de réduire la charge mentale, quitte à ne pas augmenter d'avantage la marge de sécurité leur permettant d'anticiper. Nous avons vu au chapitre 3, que la réduction du temps de réponse peut dans certaines circonstances, compenser la réduction de l'intervalle ; ce qui peut justifier le choix des participants, au moins en partie.
3. Les participants cherchent à adopter des intervalles plus longs que leur TIV minimum acceptable, quitte à ne pas voir la silhouette du véhicule pour les vitesses élevées et à augmenter ainsi la charge mentale.
4. Les participants cherchent à garder le véhicule lièvre en vue. La position de ce dernier point dans la hiérarchie est difficile à évaluer puisque, faisant partie des consignes, il était imposé aux participants. Il semblerait cependant qu'en situation de conduite réelle, plusieurs participants n'auraient pas cherché à suivre le véhicule lièvre pour la

Chapitre 4 : Contrôle de l'intervalle

vitesse la plus élevée en condition de brouillard ; indiquant que certains facteurs de sécurité (notamment la vitesse adoptée) leur semblent plus importants que le contact visuel avec le véhicule lièvre.

La priorité de ces quatre stratégies est susceptible de varier en fonction des conditions de circulation. La comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature fait en effet ressortir la diversité des situations de conduite susceptibles d'être rencontrées en situation réelle, et montre que pour chaque situation la priorité n'est pas donnée aux mêmes stratégies. Il est par ailleurs probable qu'il existe d'autres stratégies influençant le choix de l'intervalle adopté en condition de brouillard. On peut notamment se demander si le contrôle de trajectoire, rendu difficile en condition de brouillard, affecte également le choix de l'intervalle. L'étude du contrôle de trajectoire fait l'objet du chapitre 5, où nous chercherons notamment à savoir s'il affecte également l'intervalle adopté.

Chapitre 5 : Le contrôle de trajectoire

Nous avons vu dans le chapitre 4 que les conducteurs peuvent être amenés à se suivre de plus près en condition de brouillard pour faciliter le contrôle de l'intervalle. Il apparaît également que de multiples facteurs peuvent affecter l'intervalle adopté. L'objet du présent chapitre est de savoir si le contrôle de la trajectoire, rendu difficile en condition de brouillard, amène également les conducteurs à réduire leur intervalle. Il est en effet possible que le fait de suivre un véhicule permette de réduire la charge mentale allouée au contrôle de la trajectoire et/ou de le rendre plus précis en évitant les erreurs de placement sur la chaussée. Pour étudier cette hypothèse, il est nécessaire de comprendre les mécanismes en jeu lors du contrôle de la trajectoire.

1 Introduction

1.1 Modèles de contrôle de trajectoire

De nombreux auteurs (Land, 1998 ; Land & Horwood, 1995 ; Malaterre et al., 1991 ; Salvucci & Gray, 2004) sont en accord avec le modèle de double contrôle initialement proposé par Donges (1978). Selon ce modèle, le contrôle de trajectoire serait basé sur deux systèmes fonctionnant en parallèle. Il y aurait d'une part un système de guidance (contrôle proactif), fonctionnant en boucle ouverte et nécessitant une attention intermittente. Ce système permettrait de planifier les mouvements de volant à effectuer en fonction du comportement du véhicule et de la trajectoire de la route assez loin en avant, vue en vision centrale. Il y aurait d'autre part un système de stabilisation (contrôle rétroactif) fonctionnant en boucle fermée et nécessitant une attention continue. Le contrôle rétroactif permettrait de corriger les erreurs de position latérale, de cap, et de rayon de courbure en se basant sur les bords de route proches.

Le fonctionnement en boucle ouverte du niveau de guidance signifie que le conducteur n'a pas besoin de retour continu sur le résultat de ses actions. Les travaux de Hildreth, Beusmans, Boer, et Royden (2000) et de Wallis, Chatziastros, et Bülthoff (2002) montrent justement qu'il est possible dans une certaine mesure, d'effectuer des manœuvres au cours d'une occlusion

visuelle. Cette possibilité d'effectuer des manœuvres sans retour visuel montre qu'il est possible de contrôler la trajectoire en boucle ouverte, avec certaines limites. Les limites du contrôle en boucle ouverte mises en évidence par ces travaux concernent la durée d'occlusion visuelle qui doit rester inférieure à 1.5 s (Hildreth et al.) et le nombre d'actions à réaliser. Les auteurs montrent de plus que pour réaliser un changement de file, les participants réalisent correctement la première action mais ne rétablissent pas correctement le cap ; ce qui est interprété comme une stratégie du type "turn and see".

Le modèle selon lequel le contrôle de trajectoire repose sur deux systèmes prélevant les informations à des distances différentes semble également confirmé par les travaux de Land et Horwood (1995). Ils ont étudié la précision du contrôle de trajectoire lorsque les participants ne voyaient qu'un ou deux segments de route à travers des fenêtres horizontales. Leurs résultats montrent que le contrôle de trajectoire est plus précis lorsque deux segments sont positionnés de façon à prélever les informations à des distances différentes que lorsqu'un seul segment est positionné de façon optimale. Le contrôle de trajectoire est même aussi précis en présence des deux segments que lorsque la vision n'est pas limitée. Les travaux de Land et Horwood permettent également de connaître les distances optimales de prise d'information pour les deux systèmes de contrôle de trajectoire. Selon leurs résultats, le meilleur contrôle de trajectoire serait obtenu lorsque les informations sont prélevées environ 4° sous l'horizon pour le système de guidance (à une vitesse de 16.9 m/s). Puisque cette position optimale varie avec la vitesse (Land, 1998), on peut considérer qu'elle ne correspond pas à une distance mais plutôt à un intervalle temporel qui serait de 0.93 s. Land (1998) considère d'autre part que cette durée correspond à la taille d'une mémoire tampon. Elle serait ainsi sur le même plan que la durée de 1.5 s ressortant des travaux de Hildreth et al. (2000). Pour le système de stabilisation, la position optimale d'environ 7° sous l'horizon semble indépendante de la vitesse. Elle correspond alors à une distance de 8-9 m.

D'autre part, le fonctionnement des deux systèmes de contrôle de trajectoire donnerait lieu à deux pics de fréquence observés lors de l'analyse fréquentielle des mouvements de volant (Malaterre, et al., 1991 ; McLean & Hoffmann, 1973). Un pic à environ 0.1 Hz correspondrait au contrôle proactif et un autre pic à environ 0.3 Hz correspondrait au contrôle rétroactif.

Un modèle de contrôle de trajectoire a été proposé plus récemment par Salvucci et Gray (2004). Il utilise comme pour le modèle de Donges (1978) les informations provenant d'une zone proche et d'une zone lointaine, mais en se basant uniquement sur deux points. Le

premier point est situé devant le véhicule à une distance permettant de le voir correctement. Le second point est plus éloigné, et peut indifféremment correspondre au point de fuite d'une ligne droite, au point tangent d'une courbe ou à un véhicule suivi. Dans ce dernier cas, le fait de porter le regard sur le véhicule suivi peut faciliter le contrôle longitudinal. Le modèle est basé sur un contrôleur PI (Proportionnel - Intégral). Ce contrôleur ajuste continuellement la position du volant pour satisfaire trois critères : un point éloigné qui doit être stable, un point proche qui doit être stable, et un point proche qui doit être centré sur la route. Trois paramètres permettent de pondérer l'importance relative donnée aux trois contraintes. En ajustant correctement ces trois paramètres, le modèle de Salvucci et Gray permet de rendre compte de quatre phénomènes intéressants :

- Il rend compte de la précision du contrôle de trajectoire et de l'instabilité observées par Land et Horwood (1995) en fonction de la/des distances de prise d'information
- Il prédit les mouvements de volant pour des manœuvres correctives observés par Hildreth et al. (2000)
- Il prédit les mouvements de volant pour des manœuvres de changement de file observés par Wallis et al. (2002)
- Il permet de rendre compte des différences inter-individuelles

On notera tout de même que pour rendre compte de ces quatre phénomènes, les paramètres du modèle sont ajustés a posteriori.

Pour les différents modèles présentés, le contrôle de la position latérale sur la chaussée se fait à partir d'informations proches, telles que la chaussée juste devant le véhicule ou les bords de route vus en vision périphérique. Les travaux de Beal et Loomis (1996) suggèrent que les conducteurs utilisent également l'angle des marquages routiers par rapport à la verticale.

1.2 Approche écologique

Nous venons de voir des modèles de contrôle de trajectoire se basant principalement sur des mesures telles que la position latérale, le cap et le rayon de courbure. D'autres auteurs cherchent à savoir si le contrôle de trajectoire peut être guidé par le flux optique. Gibson (1958) a en effet montré que le flux optique peut renseigner sur la direction du déplacement (heading). Il suffirait alors que le point vers lequel on souhaite se diriger se trouve au niveau

du focus d'expansion. Le focus d'expansion correspond au point à partir duquel apparaissent les vecteurs vitesse qui composent le flux optique. La principale limite de la théorie de Gibson est qu'elle ne tient pas compte des mouvements des yeux et de la tête qui modifient le flux optique perçu (Wann & Land, 2000). Wann et Land concluent néanmoins que la perception de la direction du déplacement n'est pas un pré-requis pour effectuer un déplacement précis, et proposent un modèle intégrant ces aspects (Wilkie & Wann, 2002, 2003). Enfin, Fajen et Warren étudient la dynamique comportementale du déplacement et de l'évitement d'obstacles (Fajen & Warren, 2003 ; Fajen, Warren, Temizer, & Kaelbling, 2003 ; Warren & Fajen, 2004). Ils concluent que la trajectoire empruntée ne requiert pas de planification explicite mais pourrait émerger comme une conséquence de comportements élémentaires de déplacement et d'évitement d'obstacles.

Il existe d'autre part un point présentant des propriétés particulières : le point tangent de la route aussi appelé "reversal point". Ce point correspond à l'endroit où le bord de route du côté intérieur du virage change de direction. Mestre (2001) montre que le seuil de discrimination d'un changement de cap est plus bas lorsque les participants regardent vers le point tangent. Ce point peut aider au contrôle de trajectoire puisque l'angle qu'il forme par rapport au cap du véhicule, du point de vue du conducteur, est un bon indicateur de la courbure de la route (Land & Lee, 1994). Les variations de cet angle peuvent alors renseigner sur les erreurs de trajectoire. Land et Lee montrent également que les conducteurs regardent fréquemment dans une zone proche de ce point au cours de la prise de virage. La tendance à regarder vers le point tangent est même d'avantage marquée lorsque les conducteurs n'ont pas besoin de scruter la route dans le but d'anticiper d'éventuels obstacles (Underwood, Chapman, Crundall, Cooper, & Wallén, 1999) et lorsqu'il est matérialisé par une cible visuelle (Mestre, Mars, Durand, Vienne, & Espié, 2005).

Mars (2006, 2007) a cherché à savoir si la prise de virage peut être améliorée lorsque les participants regardent un point fixe tel que le point tangent. Il a ainsi réalisé une expérience sur simulateur de conduite au cours de laquelle les participants devaient fixer une cible visuelle. Cette cible pouvait correspondre au point tangent ou à un autre point à la même distance mais avec un décalage latéral. Les résultats montrent que le contrôle de trajectoire est plus précis lorsque les participants regardent la cible visuelle et que l'effort pour le contrôle de trajectoire est réduit, par rapport à une condition sans cible visuelle. Les résultats montrent d'autre part que cette amélioration du contrôle de trajectoire apparaît pour les différentes

positions latérales de la cible visuelle, mais de façon moins marquée pour la position la plus lointaine vers l'intérieur du virage. On notera également que l'amélioration du contrôle de trajectoire est équivalente lorsque la cible est placée au niveau du point tangent ou au milieu de la voie de circulation. Mars conclue alors qu'un indice visuel saillant tel qu'un véhicule lièvre, pourrait guider le contrôle latéral.

1.3 Charge mentale pour le contrôle de trajectoire

Nous venons de voir à travers les travaux de Mars (2006, 2007) que la charge mentale allouée au contrôle de trajectoire peut être réduite lorsque le regard est porté vers une cible visuelle. On peut alors se demander quels sont les éléments qui peuvent influencer la charge mentale, et en quoi ils peuvent modifier le comportement des conducteurs ?

Nous avons vu au chapitre 4 que les méthodes classiques de mesure de la charge mentale (i.e. double tâche et mesure physiologiques) présentent des problèmes de validité dans le sens où elles peuvent affecter le comportement des participants. Il existe en revanche de nombreuses mesures de la charge mentale allouée au contrôle de trajectoire basées sur les mouvements de volant, qui ne présentent donc pas cet inconvénient. Ainsi, Mac Donalds et Hoffmann (1980) présentent une mesure basée sur le nombre d'inversions du sens du volant (droite/gauche) par unité de temps : le Steering Reversal Rate (SRR). En étudiant les différents facteurs ayant un effet sur le SRR, ils concluent qu'il s'agit d'une mesure de l'effort que fait le conducteur pour contrôler la trajectoire. Malaterre et al. (1992) et Malaterre (1994) arrivent aux mêmes conclusions en trouvant une bonne corrélation entre le SRR des mesures physiologiques. Il existe d'autres mesures de la charge mentale qui sont également basées sur la fréquence des mouvements de volant. McLean et Hoffmann (1975) présentent ainsi le "High Frequency Area" (énergie correspondant aux fréquences supérieures à 0.4 Hz) qui est corrélée avec le SRR, Boer et Ward (2003) s'intéressent à la bande passante qui est corrélée avec d'autres mesures de la charge mentale, et Chatziastros, Wallis, et Bülthoff (1999) utilisent un index d'instabilité correspondant également à une mesure de la bande passante. Enfin, l'entropie présentée par Boer, Rakauskas, Ward, & Goodrich (2005a) est une mesure originale basée sur la prédictibilité des mouvements de volant.

Il ressort de ces différents travaux que la charge mentale allouée au contrôle de trajectoire est d'autant plus élevée que celui-ci est difficile. Ainsi, la charge mentale est plus élevée sur route sinueuse qu'en ligne droite (Jamson & Merat, 2005). Elle est également plus élevée

lorsque la vitesse est élevée (Malaterre, 1995) et lorsque la voie de circulation est étroite (McLean & Hoffmann, 1975). Concernant les conditions de visibilité, on observe une augmentation de la charge mentale lorsque la distance de visibilité est réduite (McLean et Hoffmann, 1975). Cet effet apparaît en particulier lorsque la vitesse est imposée, puisqu'en condition de vitesse libre les participants réduisent leur vitesse, ce qui permet de réduire la charge mentale (Malaterre et al., 1992 ; Malaterre, 1994). De plus, Land et Horwood (1995) et Chatziastros et al. (1999) trouvent un lien entre la distance à laquelle sont prélevées les informations et la charge mentale dans le sens où la charge mentale augmente lorsque les informations sont prélevées à moins de 0.6-0.7 s devant le véhicule. Mac Donalds & Hoffmann (1980) mentionnent enfin deux phénomènes intéressants. Ils observent d'une part que l'augmentation de la difficulté d'une tâche secondaire entraîne une réduction de la charge mentale allouée au contrôle de trajectoire, et d'autre part que la charge mentale allouée au contrôle de trajectoire est d'autant plus faible que le contrôle est facile. Cette dernière observation peut paraître simpliste, pourtant Brookhuis et De Waard (2002) montrent que la relation entre difficulté de la tâche, charge mentale, et performance peut être complexe lorsque la difficulté varie dans une large mesure. Le modèle proposé par Brookhuis et De Waard fait notamment apparaître une gamme de difficulté où la charge mentale augmente avec la difficulté alors que la performance reste maximale. Lorsque la charge mentale a atteint son maximum, c'est alors la performance qui diminue lorsque la difficulté de la tâche continue à augmenter.

1.4 Relation entre charge mentale et performance

Il existe une relation inverse entre charge mentale et performance, illustrée par le modèle de Brookhuis et De Waard (2002). Ainsi, pour une tâche à accomplir d'une certaine difficulté, la performance est d'autant meilleure que la charge mentale est élevée. C'est toutefois le participant ou le conducteur lui-même, influencé par la consigne ou le contexte, qui choisit la charge mentale à allouer à la tâche qu'il réalise. La performance s'en trouve alors affectée. Cet aspect de "libre arbitre" du participant (influencé par la consigne ou le contexte) peut être illustré par la différence de résultats entre Jamson et Merat (2005) et Engström, Johansson, et Östlund (2005), ainsi que la différence de résultats entre Land et Horwood (1995) et Chatziastros et al. (1999).

Boer et al. (2005a) et Jamson et Merat (2005) observent une augmentation de l'effort pour le contrôle de trajectoire en présence d'une tâche secondaire visuelle mais pas en présence d'une tâche secondaire auditive. De façon contradictoire, Engström et al. (2005) observent également une augmentation de la charge mentale lorsque la tâche secondaire est auditive. La conséquence attendue est que cette augmentation de la charge mentale pour la tâche secondaire auditive s'accompagne d'un contrôle de trajectoire plus précis, alors que ce n'est pas le cas pour la tâche secondaire visuelle. Il apparaît de façon similaire une contradiction apparente entre les résultats de Land et Horwood (1995) et ceux de Chatziastros et al. (1999). Comme nous l'avons vu, Land et Horwood observent un contrôle de trajectoire plus précis lorsque le segment de route visible se trouve à une position optimale. Au contraire, Chatziastros, et al. observent un contrôle précis pour toute une gamme de distances proches, s'accompagnant d'un indice d'instabilité élevé qui est interprété comme une charge mentale élevée. Il est possible que les différences apparaissant sur la précision du contrôle de trajectoire et sur la charge mentale soient dues à la consigne donnée aux participants par Chatziastros et al. de rouler le plus près possible du milieu de la route. On peut en effet penser que les participants ont cherché à satisfaire la consigne, améliorant ainsi la précision du contrôle de trajectoire au prix d'un effort plus important.

Les travaux qui viennent d'être présentés montrent qu'il existe une relation inverse entre charge mentale et performance pour le contrôle de trajectoire. Les travaux de Harms (1993) et Tenkink (1987) montrent qu'il existe également une relation inverse entre la vitesse propre et la performance du contrôle de trajectoire. Tenkink observe une dégradation du contrôle de trajectoire en condition de visibilité réduite lorsque la vitesse est maintenue constante. Au contraire lorsque les participants peuvent choisir leur vitesse, ils adoptent une vitesse plus faible et maintiennent ainsi un contrôle de trajectoire précis (Harms ; Tenkink). Ces résultats montrent que la difficulté accrue du contrôle de trajectoire en condition de visibilité réduite peut être compensée par une réduction de la vitesse, permettant aux conducteurs de limiter les variations de la position latérale. Selon van Winsum & Godthelp (1996), le contrôle des marges de sécurité opère comme un mécanisme de régulation de la vitesse. Les participants seraient alors contraints de réduire leur vitesse pour ne pas franchir les marges de sécurité qu'ils se sont fixées. Les travaux de Godthelp, Milgram, et Blaauw (1984) montrent effectivement que la correction de la trajectoire par les conducteurs serait basée sur une marge de sécurité temporelle. Cette marge de sécurité est mesurée par le TLC (Time to Line Crossing), correspondant au temps restant avant le franchissement du bord de route, si aucune

action de correction n'est entreprise par le conducteur. Godthelp et al. montrent que l'instant où les participants souhaitent avoir de nouvelles informations visuelles (lorsque la route est masquée) correspond à une valeur constante du TLC.

1.5 Influence du brouillard sur les mécanismes du contrôle de trajectoire

Nous avons vu que le contrôle de trajectoire repose sur le fonctionnement parallèle de deux systèmes qui prélèvent les informations à des distances différentes. Un brouillard suffisamment dense est susceptible de masquer partiellement ou totalement les informations utilisées par le système proactif. Il semblerait que lorsque ce système ne dispose pas des informations nécessaires à son fonctionnement, le contrôle de trajectoire repose entièrement sur le système rétroactif (Land, 1998). Les résultats de Malaterre et al. (1991) portant sur l'analyse spectrale des mouvements de volant, vont dans le sens de cette hypothèse puisque la présence de brouillard conduit à la disparition de pic à 0.1 Hz correspondant au fonctionnement du système proactif. De façon similaire, McLean et Hoffmann (1973) observent que le pic de fréquence élevée (0.3 à 0.6 Hz) est d'avantage présent pour les conditions de visibilité réduite. Selon Salvucci et Gray (2004), leur modèle peut également rendre compte de la conduite en condition de visibilité réduite. Il suffirait en effet d'adapter les pondérations, i.e. les paramètres du modèle, pour rendre compte du contrôle de trajectoire reposant principalement sur la zone proche. McLean et Hoffmann observent d'autre part que le contrôle de trajectoire devient moins précis lorsque la distance de visibilité est inférieure à environ 20 m.

La plus grande difficulté à contrôler la trajectoire en condition de brouillard peut d'autre part être compensée par une augmentation de la charge mentale, afin de ne pas franchir les marges de sécurité que les participants se sont fixées. De plus, et contrairement au système proactif qui nécessite une attention intermittente, le système rétroactif nécessite une attention permanente. La charge mentale devrait donc être plus élevée lorsque la visibilité est réduite. Les résultats de McLean et Hoffmann (1975) confirment cette interprétation puisqu'ils observent une charge mentale plus élevée lorsque la visibilité est limitée. D'autre part, les index d'instabilités utilisés par Chatziastros et al. (1999) et par Land & Horwood (1995) permettent de mesurer la charge mentale. De façon cohérente avec l'hypothèse présentée ci-dessus, l'index d'instabilité augmente lorsque le segment de route visible est proche (distance inférieure à 10-12 m environ).

D'autre part, nous avons vu que les conducteurs ont une nette tendance à regarder vers le point tangent au cours de la prise de virage. De plus, Mars (2006, 2007) montre que le contrôle de trajectoire est plus précis et plus facile lorsque les participants regardent une cible placée au niveau du point tangent. Ces éléments nous amènent à penser que la prise de virage pourrait être détériorée lorsque le brouillard masque le point tangent, conduisant à un contrôle moins précis de la trajectoire et à une charge mentale plus élevée.

1.6 Contrôle de trajectoire, brouillard, et suivi de véhicule

Nous venons de voir que le contrôle de trajectoire est rendu difficile en condition de brouillard, se traduisant par des écarts latéraux plus importants (Tenkink, 1987). Cette difficulté peut être compensée par une réduction de la vitesse. Nous supposons également qu'elle peut être compensée, au moins partiellement, par une augmentation de la charge mentale. Ces deux modes de compensation étant contraignants, les conducteurs pourraient chercher à utiliser le véhicule suivi comme guide. Les travaux de Mars (2006, 2007) suggèrent en effet qu'un indice visuel saillant tel qu'un véhicule lièvre pourrait guider le contrôle latéral. De la même façon, le point éloigné dans le modèle de Salvucci et Gray (2004) peut correspondre à un véhicule suivi. Les pondérations de leur modèle pourraient alors prendre des valeurs proches de la normale, par opposition aux conditions de visibilité dégradées sans véhicule lièvre. D'autre part, le pic de fréquence des mouvements de volant correspondant au système proactif disparaît en condition de brouillard. Malaterre et al. (1991) s'attendaient à ce que ce pic réapparaisse en présence d'un véhicule lièvre. Cela n'a cependant pas été observé, peut-être à cause du petit nombre de participants (4 participants).

On peut se demander s'il existe des contraintes du point de vue de l'intervalle pour pouvoir utiliser le véhicule lièvre comme guide. D'après Malaterre et al. (1991), l'utilisation du véhicule lièvre comme guide nécessite non seulement de le garder en vue, mais également d'adopter des distances de suivi relativement courtes pour que des erreurs de position latérale restent négligeables. On suppose ici que si les conducteurs utilisent le véhicule lièvre comme guide alors ils auront tendance à se diriger vers lui, et donc à couper les virages. Les travaux de Land et Horwood (1995) permettent de préciser cette réponse. On peut faire un parallèle entre le suivi de véhicule en condition de visibilité réduite et leur condition expérimentale où l'un des deux segments de route visible était proche et l'autre à une distance variable. Le segment proche correspondrait à la chaussée visible juste devant le véhicule et le segment

éloigné correspondrait au véhicule suivi. Dans ce cas, ils observent une position optimale du second segment à 0.93 s devant le véhicule. Les index d'instabilité calculés par Land et Horwood et par Chatziastros et al. (1999) nous amènent d'autre part à penser que la charge mentale devrait augmenter avec la réduction de l'intervalle lorsque celui-ci est inférieur à environ 1 s.

1.7 Au-delà des modèles, les aspects pratiques

On peut supposer que pour faciliter le contrôle de trajectoire, le véhicule suivi doit apporter des informations supplémentaires à celles déjà fournies par la chaussée, se traduisant par la nécessité de suivre le véhicule de suffisamment loin pour qu'il se trouve à une distance à laquelle la chaussée n'est pas visible. Etant donné le contraste intrinsèque (contraste vu à une distance nulle, ou par temps clair) important entre les marquages et le bitume, nous considérons que la chaussée peut être vue jusqu'à la distance de visibilité météorologique. On peut tout de même penser que les informations fournies par la chaussée sont difficiles à extraire lorsque son contraste est faible. A contrario, les feux de brouillard arrière des véhicules ont une intensité lumineuse importante (150 à 300 candelas) ce qui devrait permettre à l'observateur d'en extraire l'information plus facilement. On peut donc penser que le véhicule suivi est également susceptible de faciliter le contrôle de trajectoire lorsqu'il est suivi à une distance courte pour laquelle la chaussée est également visible. On peut alors supposer que le TIV optimal correspond à l'intervalle auquel le système proactif prélève les informations, soit 0.9-1 s. L'adoption d'un TIV de l'ordre de 1 s en condition de brouillard amènerait les conducteurs à se suivre de près que par temps clair et les placerait ainsi dans une situation dangereuse.

Contrairement aux résultats de Land et Horwood (1995), d'autres auteurs (Neboit, 1974 ; McLean & Hoffmann, 1973) considèrent que le contrôle de trajectoire nécessite de voir à une distance correspondant à un intervalle de 3 s. On peut en effet penser que pour le confort et la sécurité, il est préférable de connaître le sens et le rayon de courbure des virages avant leur entrée. Land et Lee (1994) observent notamment en situation de conduite réelle que les conducteurs regardent le point tangent entre 1 et 3 s avant l'entrée dans le virage. Cette observation nous amène à distinguer l'anticipation liée au contrôle de trajectoire et l'anticipation liée au contrôle de l'intervalle et de la vitesse. Comme nous l'avons vu, le contrôle de trajectoire devrait être le plus performant lorsque l'intervalle est de l'ordre d'une

seconde. La nécessité d'anticiper les virages plusieurs secondes à l'avance afin d'évaluer leur rayon de courbure relève plutôt du choix d'une vitesse adaptée que du contrôle de trajectoire. Or si le conducteur se fie au comportement du véhicule lièvre, l'adoption d'une vitesse adaptée peut se faire en adoptant la même vitesse que le véhicule suivi et donc en contrôlant l'intervalle. Ainsi, si l'on suppose que le comportement du véhicule lièvre est fiable et adapté (par exemple s'il connaît la route et qu'il a une conduite "raisonnable"), alors il suffira d'avoir la même décélération que lui pour aborder les virages dans de bonnes conditions. L'adoption d'une stratégie consistant à suivre le véhicule lièvre de près suppose donc que le conducteur se repose sur le véhicule suivi et renonce à un certain degré d'anticipation. L'adoption de cette stratégie nécessite de contrôler précisément l'intervalle, tel que nous l'avons étudié à travers le seuil de perception du mouvement.

1.8 Hypothèses

Nous faisons l'hypothèse que les conducteurs utilisent le véhicule lièvre comme guide pour faciliter le contrôle de trajectoire en condition de brouillard. Nous supposons que cette stratégie permet d'améliorer la précision du contrôle de trajectoire et/ou de réduire la charge mentale, à condition que le véhicule lièvre soit suivi à intervalle optimal, soit environ 1 s. Cette hypothèse peut être décomposée selon plusieurs volets :

1. Nous supposons que le véhicule lièvre est utilisé comme guide directionnel en condition de brouillard mais pas par temps clair.
2. Nous faisons l'hypothèse que le contrôle de trajectoire est plus difficile (charge mentale plus élevée) en condition de brouillard que par temps clair, et qu'en condition de brouillard la difficulté augmente avec la réduction de l'intervalle lorsque celui-ci est inférieur à environ 1 s.
3. Nous faisons l'hypothèse que le contrôle de trajectoire est moins précis en condition de brouillard que par temps clair, et qu'en condition de brouillard il est plus précis autour de 1 s. On suppose d'autre part que le contrôle de trajectoire est moins précis lorsque le point tangent est masqué par le brouillard.
4. Nous supposons que s'il y a un bénéfice pour le contrôle de trajectoire à suivre le véhicule à un intervalle donné, alors les participants auront tendance à se rapprocher de cet intervalle en condition de brouillard, par rapport à la condition sans brouillard.

2 Méthode

L'expérience de suivi de véhicule présentée au chapitre précédent comportait dix conditions expérimentales. Les six conditions de ligne droite nous ont permis d'étudier le contrôle de l'intervalle. Nous allons maintenant nous intéresser aux quatre conditions de route sinueuse afin d'étudier le contrôle de trajectoire. Les grandes lignes de la méthode ainsi que les aspects spécifiques aux conditions de route sinueuse sont présentées ici. Nous invitons le lecteur à se reporter au chapitre précédent s'il souhaite se remémorer la méthode de façon plus précise.

2.1 Grandes lignes de la méthode

Il s'agit d'une expérience de suivi de véhicule réalisée sur le simulateur de conduite de l'INRETS. 48 participants ayant leur permis de conduire depuis plus de deux ans et ayant parcouru plus de 20 000 km ont mené l'expérimentation jusqu'à son terme. Il leur a été demandé de suivre le véhicule lièvre sans le perdre de vue, et en empêchant qu'un autre véhicule puisse s'intercaler entre eux et le véhicule lièvre. Pour chaque condition expérimentale, le véhicule lièvre roule sur la route sinueuse au milieu de sa voie de circulation. Il réalise ainsi un parcours dont la longueur est 4.4 km et la durée de 5 minutes. Ce parcours se compose de quatre phases : une phase de démarrage, une phase d'adaptation d'une minute, une phase expérimentale de trois minutes, et une phase d'arrêt. Seule la phase expérimentale sera utilisée pour les traitements. La phase d'adaptation a pour but de permettre aux participants d'adapter leur comportement aux conditions de visibilité et à la vitesse du véhicule lièvre.

Les quatre conditions expérimentales auxquelles nous nous intéressons correspondent à la combinaison de deux conditions de visibilité et de deux conditions de vitesse. Les deux conditions de visibilité sont *temps clair* et *brouillard* (DVM=32 m). Les deux conditions de vitesse correspondent d'une part à une vitesse du véhicule lièvre constante de 16 m/s, et d'autre part une vitesse variable dont la moyenne est 16 m/s. Les variations de vitesse utilisées pour la condition *vitesse variable* ont été construites à partir d'enregistrements de la vitesse pratiquée en conduite libre sur la route sinueuse (cf. chapitre précédent pour plus de détails), permettant une bonne cohérence entre les variations de vitesses et les courbures de la route.

La vitesse du véhicule lièvre est comprise entre 10 et 20.8 m/s et son accélération est comprise entre -1.5 et $+1$ m/s².

2.2 Route sinueuse

La route sinueuse se compose d'une succession de virages et de lignes droites. Les lignes droites ont une longueur de 50 m et il y a huit types de virages. Le type de virage est défini par le rayon de courbure (100 ou 200 m), l'angle de courbure (22.5 ou 45°), et la direction du virage (droite ou gauche). La longueur L des virages est donnée par $L = R.\theta$ où R représente le rayon de courbure en mètres, et θ représente l'angle de courbure en radians. Etant donné les rayons et angles de courbure, la longueur des virages peut être de 39.3, 78.5, ou 157.1 m. La Figure 58 représente une vue de dessus de la route sinueuse. Nous nous référerons aux virages ayant un rayon de courbure de 100 m comme *virages serrés*, et à ceux ayant un rayon de courbure de 200 m comme *virages larges*.

La phase expérimentale de chaque parcours se compose de 8 virages à droite et de 11 virages à gauche (Tableau 7). Leurs rayons et angles de courbure sont indiqués dans le tableau ci-dessous. La phase d'adaptation comporte sept virages. Il y a un virage de chaque type, sauf pour le type suivant : rayon de courbure de 100 m, angle de courbure de 45°, courbure à gauche. Les virages rencontrés dans la phase d'adaptation sont donc représentatifs de l'ensemble des virages rencontrés.

Chapitre 5 : Contrôle de la trajectoire

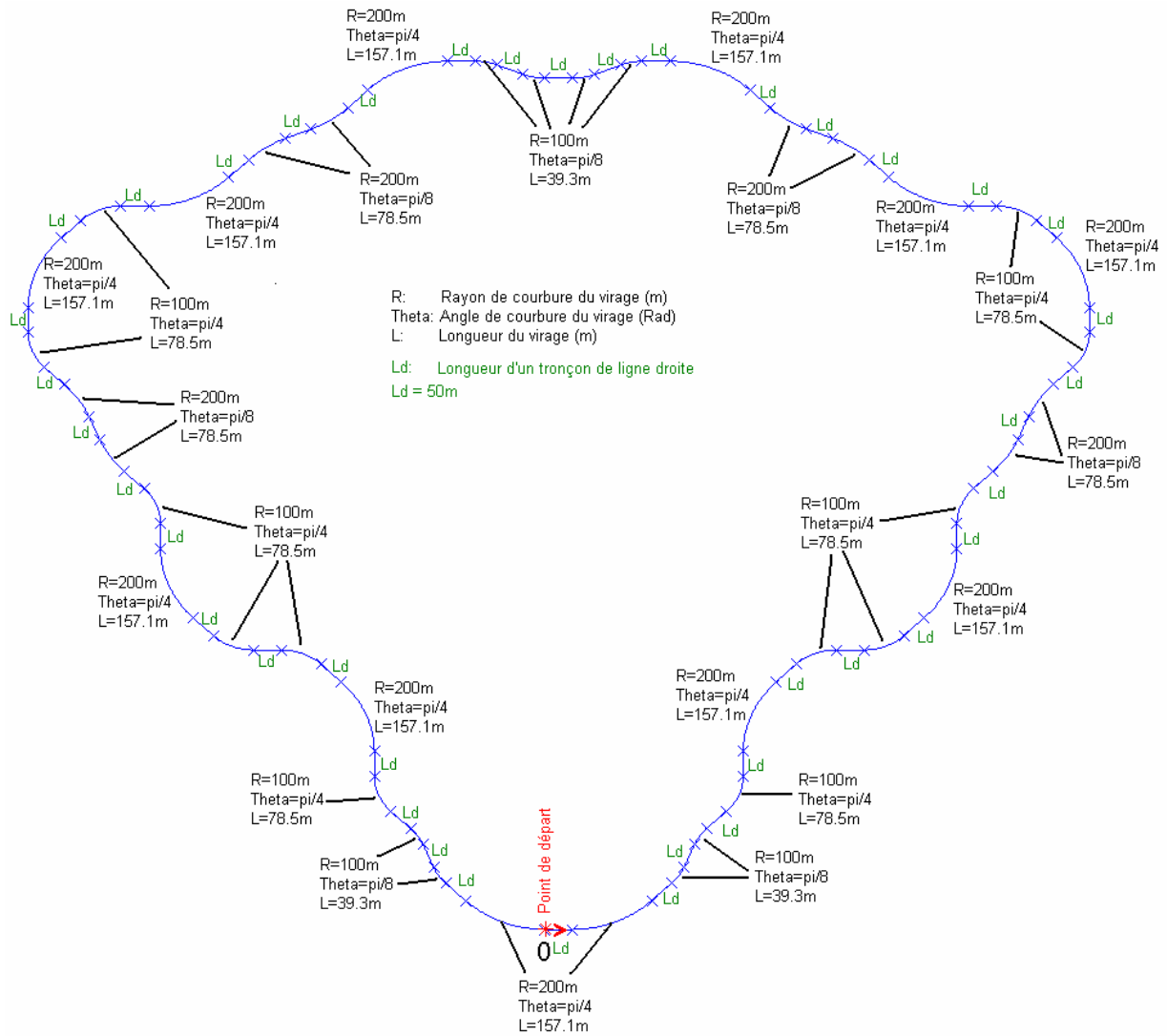


Figure 58 : Vue de dessus schématique de la route sinueuse

| Rayon de courbure (m) | Angle de courbure (°) | Nombre de virages... | |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------------|
| | | ...à droite | ...à gauche |
| 100 | 22.5 | 2 | 2 |
| 100 | 45 | 2 | 4 |
| 200 | 22.5 | 2 | 2 |
| 200 | 45 | 2 | 3 |

Tableau 7 : Nombre de virages à droite et à gauche pour chaque type de virages, pour la phase expérimentale uniquement.

Chapitre 5 : Contrôle de la trajectoire

Comme pour la route en ligne droite, la route sinueuse se compose de deux voies de 3.5 m de large séparées par un marquage axial discontinu. La chaussée texturée est de couleur grise et est délimitée par des lignes blanches continues. Les bas-côtés sont verts, et des arbres sont plantés sur les bords de route (Figure 59).

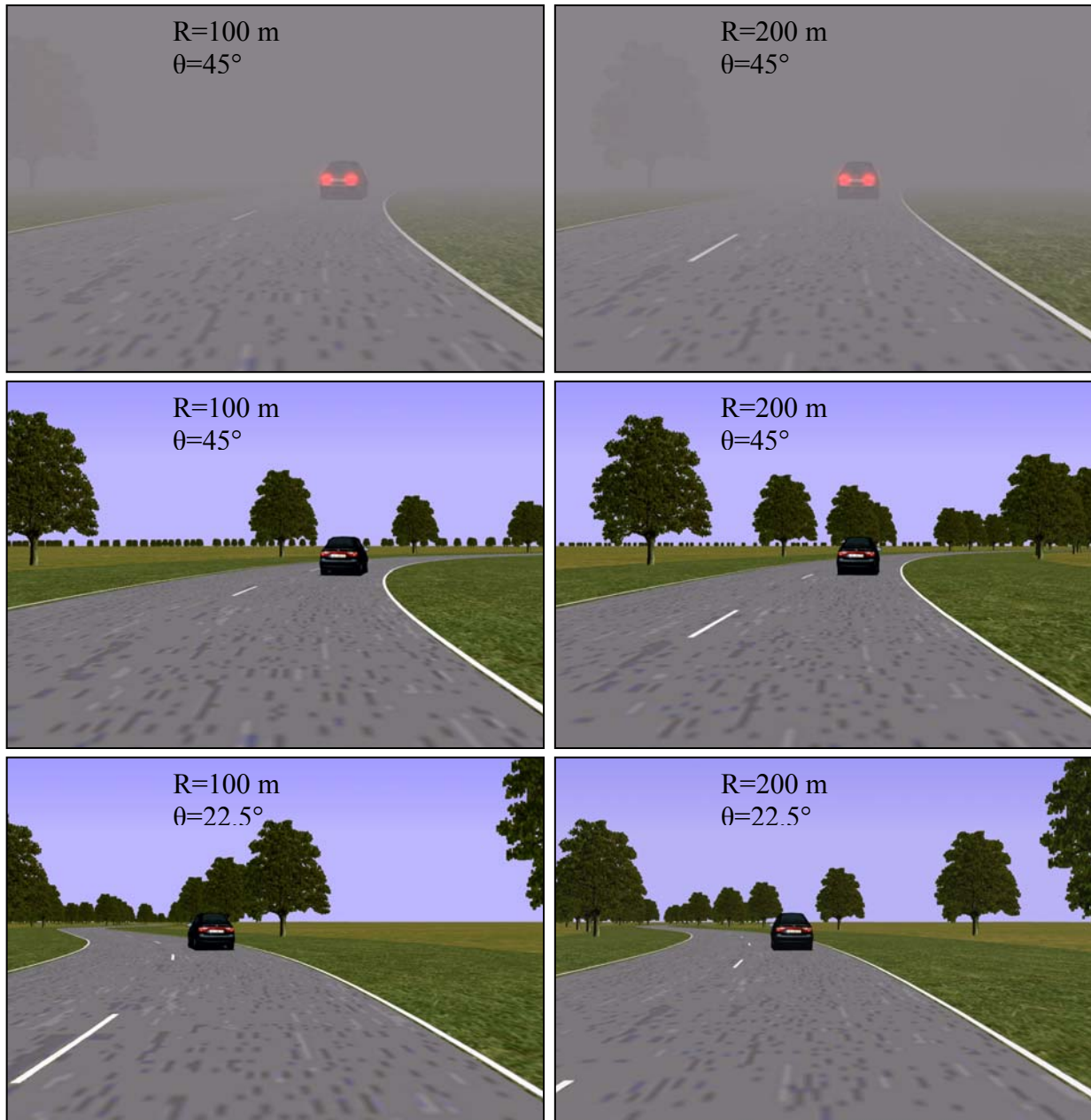


Figure 59 : Captures de l'écran central du simulateur représentant les virages de la route sinueuse. Le rayon de courbure (R) et l'angle de courbure (θ) des virages sont indiqués sur chaque image. Dans tous les cas, la distance entre l'œil de l'observateur et le pare-choc arrière du véhicule lièvre est de 22.6 m.

2.3 Visibilité du point tangent

Le point tangent est susceptible d'être utilisé pour le contrôle de trajectoire et sa visibilité sera réduite en condition de brouillard. Le contraste du point tangent en cours de virage dépend de plusieurs facteurs : la courbure de la route, la position latérale de l'observateur, et la densité du brouillard. La formule donnée dans la Figure 60 permet de calculer la distance du point tangent en cours de virage, i.e. une fois que le véhicule est entré dans le virage.

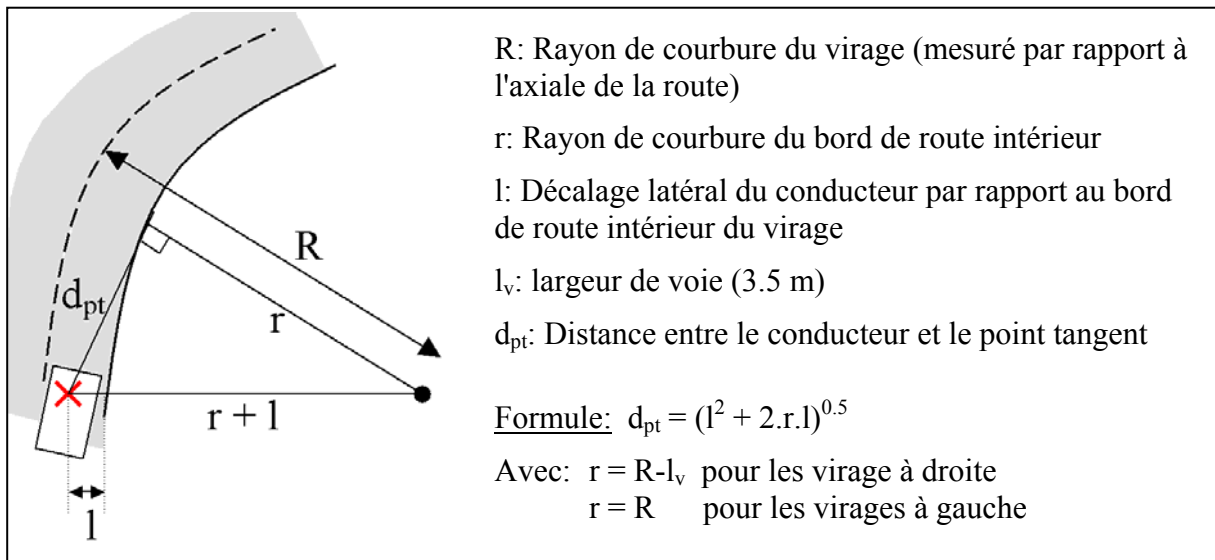


Figure 60 : Calcul de la distance du point tangent en fonction du rayon de courbure du virage, et de la position latérale du conducteur sur la chaussée. Le schéma représente une vue de dessus du virage où le conducteur est représenté par une croix. La formule en bas à droite donne la distance entre le conducteur et le point tangent. Cette formule est valable en cours de virage, i.e. une fois que le véhicule est entré dans le virage.

A partir de la distance du point tangent, on peut calculer son contraste grâce à la loi de Koschmieder. Le Tableau 8 présente la distance du point tangent et son contraste en fonction du rayon de courbure du virage et de la position latérale du conducteur. Le calcul du contraste montre que le point tangent est visible pour les virages ayant un rayon de courbure de 100 m. Au contraire pour les virages ayant un rayon de courbure de 200 m, le contraste est généralement inférieur à 5%. Le point tangent est donc peu visible ou complètement masqué pour ce type de virages. D'après nos hypothèses, le brouillard devrait dégrader la précision du contrôle de trajectoire, en particulier pour les virages larges puisque le point tangent est masqué en condition de brouillard.

| Rayon de courbure du virage | Position latérale du conducteur par rapport au centre de la voie (positif vers l'extérieur du virage) | Distance du point tangent (virage à droite) | Contraste du point tangent (virage à droite) |
|-----------------------------|---|---|--|
| R=100 m | -0.6 m | 14.9 m | 12.3% |
| | -0.5 m | 15.6 m | 11.6% |
| | 0 | 18.5 m | 8.9% |
| | +0.6 m | 21.4 m | 6.7% |
| R=200 m | -0.6 m | 21.3 m | 6.8% |
| | -0.4 m | 23.1 m | 5.8% |
| | 0 | 26.3 m | 4.3% |
| | +0.6 m | 30.5 m | 2.9% |

Tableau 8 : Distance entre le conducteur et le point tangent et contraste du point tangent en fonction du rayon de courbure du virage et de la position latérale du conducteur par rapport au centre de la voie (positif vers le côté extérieur du virage). Les calculs se basent sur une largeur de voie de 3.5 m, une distance de visibilité météorologique de 32 m, et un contraste intrinsèque du point tangent de 50%. Le contraste intrinsèque du point tangent correspond au contraste entre la ligne blanche (luminance=1 sur une échelle de 0 à 1) et la chaussée (luminance=0.5). Puisque les résultats sont très proches pour les virages à droite et à gauche, nous ne les avons présentés que pour les virages à droite. Les valeurs en gras seront utilisées ultérieurement.

2.4 Accélération latérale

La vitesse du véhicule lievre en cours de virage doit être adaptée à la courbure des virages. Les deux contraintes que nous souhaitons satisfaire sont les suivantes : il faut d'une part que la vitesse soit réaliste, i.e. pas trop élevée, et d'autre part que la prise de virage présente un minimum de difficultés afin de faire ressortir un éventuel effet du brouillard.

En situation réelle, l'accélération latérale, et donc la vitesse en cours de virage, sont d'abord limitées par les limites d'adhérence du véhicule. La limite d'adhérence des pneus correspond en effet à une accélération maximale. Le modèle proposé par Reymond, Kemeny, Droulez, et Berthoz (2001) suppose que les conducteurs gardent une marge de sécurité par rapport à l'accélération maximale. Cette marge permet de faire face aux événements imprévus

et de corriger les erreurs de trajectoire. Ils observent d'autre part que la marge de sécurité (différence entre l'accélération pratiquée et l'accélération maximale) est d'autant plus grande que la vitesse est élevée. Sur simulateur, l'accélération latérale est peu restituée, voire pas du tout restituée pour les simulateurs à base fixe, et l'adhérence des pneus n'est généralement pas prise en compte. La vitesse de franchissement d'un virage n'est donc pas limitée par la tenue de route du véhicule. Reymond et al. montrent tout de même que les conducteurs gardent un style de conduite consistant, même lorsque le simulateur ne restitue aucun mouvement.

Felipe et Navin (1998) ont étudié l'accélération latérale en cours de virage en situation réelle, pour une conduite confortable et pour une conduite à vitesse maximale. Ils constatent que la vitesse augmente de façon logarithmique avec le rayon de courbure des virages. A partir des lois qu'ils ont établies, nous pouvons chercher à savoir si la vitesse du véhicule lièvre de notre expérience est cohérente avec le rayon de courbure des virages. Après avoir calculé l'accélération latérale pour la condition de *vitesse constante* de la présente expérience¹¹, on peut la comparer aux accélérations latérales correspondant aux lois établies par Felipe et Navin (Tableau 9). On constate que les accélérations latérales pour notre expérience sont supérieures aux accélérations latérales d'une conduite confortable et inférieures à celles d'une conduite à vitesse maximale. Nous nous plaçons donc dans une situation de conduite réaliste. Les participants seront plus particulièrement sollicités pour le contrôle de trajectoire dans les virages serrés ($R=100$ m) puisque l'accélération latérale pour ces virages correspond approximativement à celle d'une conduite à vitesse maximale en situation réelle. Les contraintes que nous nous sommes fixées semblent donc satisfaites pour la condition de *vitesse constante*. D'autre part pour la condition de *vitesse variable*, la vitesse est réduite en cours de virage, en particulier pour le rayon de courbure de 100 m. L'accélération latérale y est donc plus faible pour les virages serrés et devrait se rapprocher de la condition de conduite confortable de Felipe et Navin.

¹¹ L'accélération latérale (γ) dans un virage est donnée par $\gamma=v^2/R$ où v représente la vitesse (m/s) et R représente le rayon de courbure du virage (m). On suppose que les conducteurs suivent la courbure de la route et on néglige le décalage latéral du véhicule par rapport à l'axiale de la route. Pour la condition de *vitesse constante* (16 m/s²), les accélérations latérales sont respectivement 2.56 et 1.28 m/s² pour les virages ayant des rayons de courbure de 100 et 200 m.

| Rayon de courbure (m) | Accélération latérale (m/s ²) | | |
|--------------------------|--|--|--|
| | Conduite confortable (dédit de Felipe & Navin, 1998) | Vitesse maximale (dédit de Felipe & Navin, 1998) | Condition <i>vitesse</i> <i>constante</i> (16 m/s) de la présente expérience |
| 100 | 1.65 | 2.78 | 2.56 |
| 200 | 1.14 | 1.93 | 1.28 |

Tableau 9 : Accélération latérale (m/s²) en fonction du rayon de courbure pour trois vitesses de conduite : vitesse pratiquée pour la consigne "conduite confortable" de Felipe et Navin (1998) ; vitesse pratiquée pour la consigne "vitesse maximale" de Felipe et Navin (1998) ; et vitesse pratiquée pour la condition vitesse constante de la présente expérience.

3 Résultats

Comme nous l'avons vu, notre hypothèse se compose de quatre volets portant sur l'utilisation du véhicule lièvre comme guide, sur la charge mentale, sur la précision du contrôle de trajectoire, et enfin sur les intervalles pratiqués. Ces quatre volets ont été étudiés à partir des données de l'expérience de suivi de véhicule. Puisque ces hypothèses portent sur le contrôle de trajectoire, nous nous sommes uniquement intéressés aux conditions de conduite sur route sinueuse. De plus, nous nous sommes plus particulièrement focalisés sur la condition de vitesse constante, afin de différencier autant que possible le contrôle de trajectoire et le contrôle de l'intervalle. Enfin, le traitement des résultats a porté uniquement sur la phase expérimentale de chaque parcours. Cette phase a une durée de 3 minutes et correspond à une distance parcourue de 2880 m.

3.1 Le véhicule lièvre sert-t-il de guide ?

Le contrôle de trajectoire repose habituellement sur les informations provenant de la chaussée et de l'environnement. Nous faisons l'hypothèse qu'en condition de brouillard, les participants utilisent en partie les informations fournies par le véhicule suivi pour contrôler la trajectoire. On peut classer ces informations en deux catégories :

- La position présente du véhicule lièvre (distance, angle par rapport au plan sagittal de l'observateur, et éventuellement angle de vue sur le véhicule : vue sur le côté).

- La trajectoire suivie par le véhicule lièvre, à condition de pouvoir la mémoriser et la transposer

L'utilisation de la position présente du véhicule lièvre pour le contrôle de trajectoire amènerait les participants à se diriger vers lui et ainsi à couper les virages (Figure 61). En cours de virage, l'angle entre le véhicule lièvre et le plan sagittal de l'observateur augmente avec l'interdistance. Les virages seraient alors d'autant plus coupés que la distance intervéhiculaire est grande. D'autre part, si elle est possible, la mémorisation de la trajectoire suivie par le véhicule lièvre devrait permettre aux participants d'anticiper la courbure de la route. Cette anticipation serait d'autant plus grande que le véhicule lièvre est éloigné. Une plus grande anticipation devrait alors permettre de suivre une trajectoire plus proche de celle suivie par temps clair. Or, d'après Tenkink (1987) les conducteurs coupent plus les virages lorsque la visibilité est bonne. Ce raisonnement nous amène à penser que l'utilisation du véhicule lièvre comme guide amènerait les participants à couper les virages indépendamment du type d'informations prises en compte, et que ce phénomène augmenterait avec l'interdistance. Autrement dit, les participants se rapprocheraient d'autant plus du bord intérieur du virage en condition de brouillard que le véhicule lièvre est éloigné. Cette relation entre l'interdistance et la position latérale ne devrait en revanche pas apparaître par temps clair puisque l'on suppose que le contrôle de trajectoire ne repose pas sur le véhicule suivi.

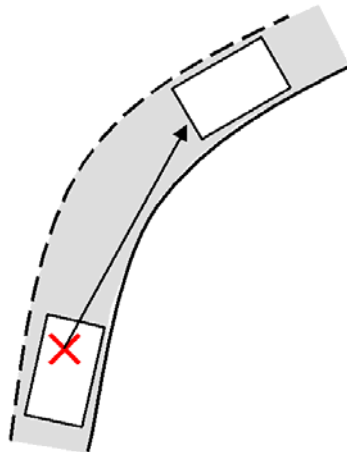


Figure 61 : Si le véhicule suiveur se dirige vers le véhicule lièvre, alors il aura tendance à couper le virage.

3.1.1 Méthode de calcul

La route sinueuse comporte huit types de virages, qui peuvent être classés en quatre catégories si l'on ne distingue pas les virages à droite et à gauche. Ces catégories de virages sont définies par leur rayon de courbure (100 ou 200 m) et leur angle de courbure (22.5 ou

45°). La longueur des virages peut ainsi être de 39.3, 78.5 ou 157.1 m. Puisque nous cherchons à mesurer le décalage latéral du véhicule en cours de virage, il est nécessaire de définir des zones sur lesquelles nous allons effectuer cette mesure.

Selon Donges (1978), le parcours du virage peut être décomposé en trois étapes : une étape d'entrée dans le virage au cours de laquelle le conducteur tourne le volant ; une étape au cours de laquelle il maintient l'angle du volant tout en corrigeant les erreurs ; et une étape de sortie de virage au cours de laquelle le volant revient en position centrale. Comme Donges, nous constatons l'existence de ces trois étapes, au moins pour les virages longs (Figure 62). De façon similaire, nous supposons que ces trois étapes s'appliquent également à la position latérale du véhicule. Il y aurait d'abord un décalage vers l'intérieur du virage à l'entrée du virage (éventuellement anticipation et placement du côté opposé avant le virage), puis un maintien de la position latérale tout en corrigeant les erreurs en cours de virage, et enfin la sortie de virage en reprenant la position latérale initiale (avec éventuellement un écart du côté opposé). Le comportement des participants au cours de l'expérience semble aller dans le sens de cette hypothèse, au moins pour les virages longs (Figure 63). En nous basant sur la Figure 63, nous avons choisi comme zones de mesure, la partie centrale des virages au cours de laquelle la position latérale varie peu. Ces zones sont délimitées sur la Figure 63 par des traits pointillés verticaux, et ont respectivement une longueur de 20, 50 et 100 m pour les virages ayant des longueurs de 39.3, 78.5 ou 157.1 m. De plus, elles sont centrées sur le milieu de virage. Ces zones de mesures seront à nouveau utilisées pour l'étude de la précision du contrôle de trajectoire.

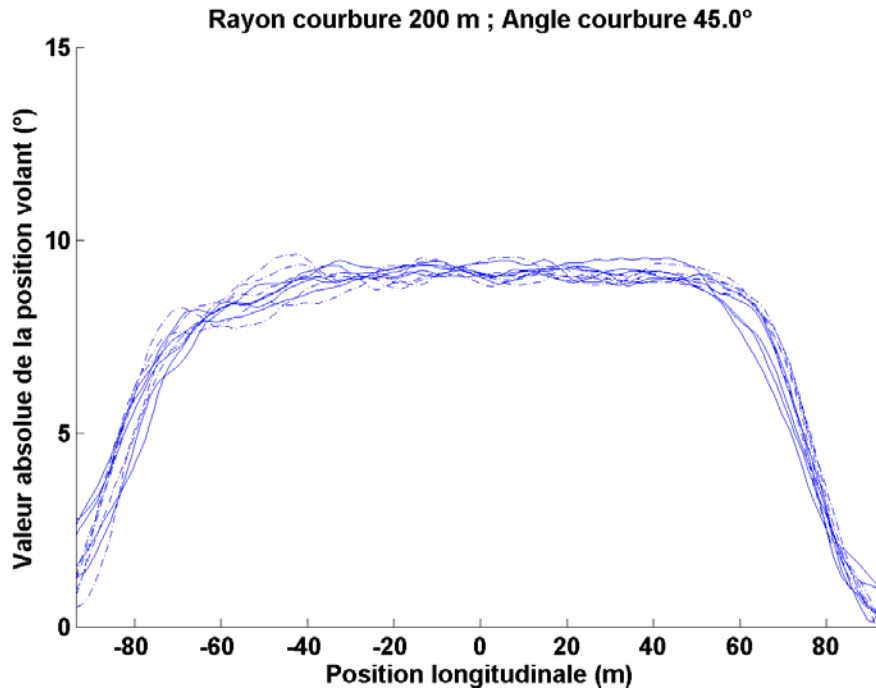


Figure 62 : Valeur absolue de l'angle du volant (°) en fonction de la position longitudinale (m) du véhicule dans un virage long (Rayon de courbure de 200 m, et angle de courbure de 45°). Le 0 sur l'axe des abscisses correspond au milieu du virage. Chaque tracé correspond à la moyenne de l'angle du volant sur les 48 participants pour un virage donné et une condition de visibilité donnée. Les 10 tracés correspondent à la combinaison des 5 virages du parcours et des deux conditions de visibilité.

D'autre part, la Figure 63 présente le décalage de position latérale pour les virages à droite et à gauche. Celui-ci est mesuré par rapport à la position latérale moyenne sur le parcours et est positif vers l'intérieur du virage (positif à droite pour les virages à droite et inversement pour les virages à gauche). On constate que le décalage de position latérale présente le même profil pour l'ensemble des virages. Il ne semble donc pas nécessaire de distinguer les virages à droite et à gauche. A partir de ces observations, nous avons choisi d'utiliser la mesure de décalage latéral telle qu'elle vient d'être définie, en calculant sa valeur moyenne sur les zones de mesure qui viennent également d'être définies. Enfin, nous n'avons traité que la condition de vitesse constante puisque la trajectoire en cours de virage est liée à la vitesse.

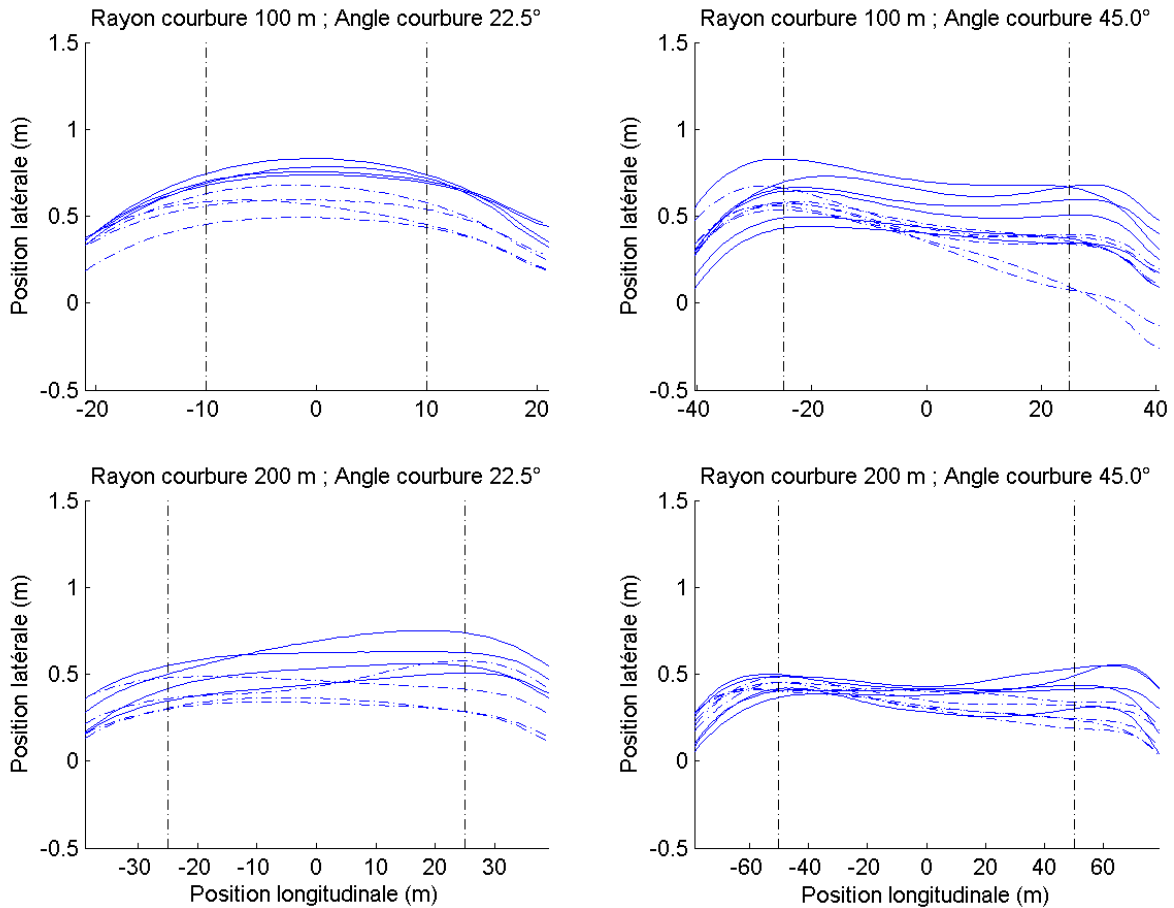


Figure 63 : Décalage de position latérale (m) en fonction de la position longitudinale (m) du véhicule dans un virage de type donné. Le 0 sur l'axe des abscisses correspond au milieu du virage, et le 0 sur l'axe des ordonnées correspond à la position latérale moyenne sur le parcours. Le décalage de position latérale est positif vers l'intérieur du virage (positif à droite pour les virages à droite et inversement pour les virages à gauche). Les quatre graphiques correspondent à quatre types de virages (Rayon de courbure x Angle de courbure). Chaque tracé correspond à la moyenne de la position latérale sur les 48 participants pour un virage donné et une condition de visibilité donnée (traits continus : temps clair ; tirets : brouillard). Les traits verticaux délimitent les zones qui seront utilisées pour les traitements pour chaque type de virage.

3.1.2 Résultats concernant le décalage latéral en cours de virage

La Figure 64 présente le décalage de la position latérale en cours de virage en fonction de l'intervalle et de la condition de visibilité, pour les différentes catégories de virages. On constate d'une part que le décalage latéral semble augmenter avec l'intervalle en condition de brouillard mais pas par temps clair. On constate d'autre part que ce comportement apparaît pour les quatre catégories de virages. Nous avons donc choisi de regrouper les différentes catégories de virages pour les traitements ultérieurs.

Chapitre 5 : Contrôle de la trajectoire

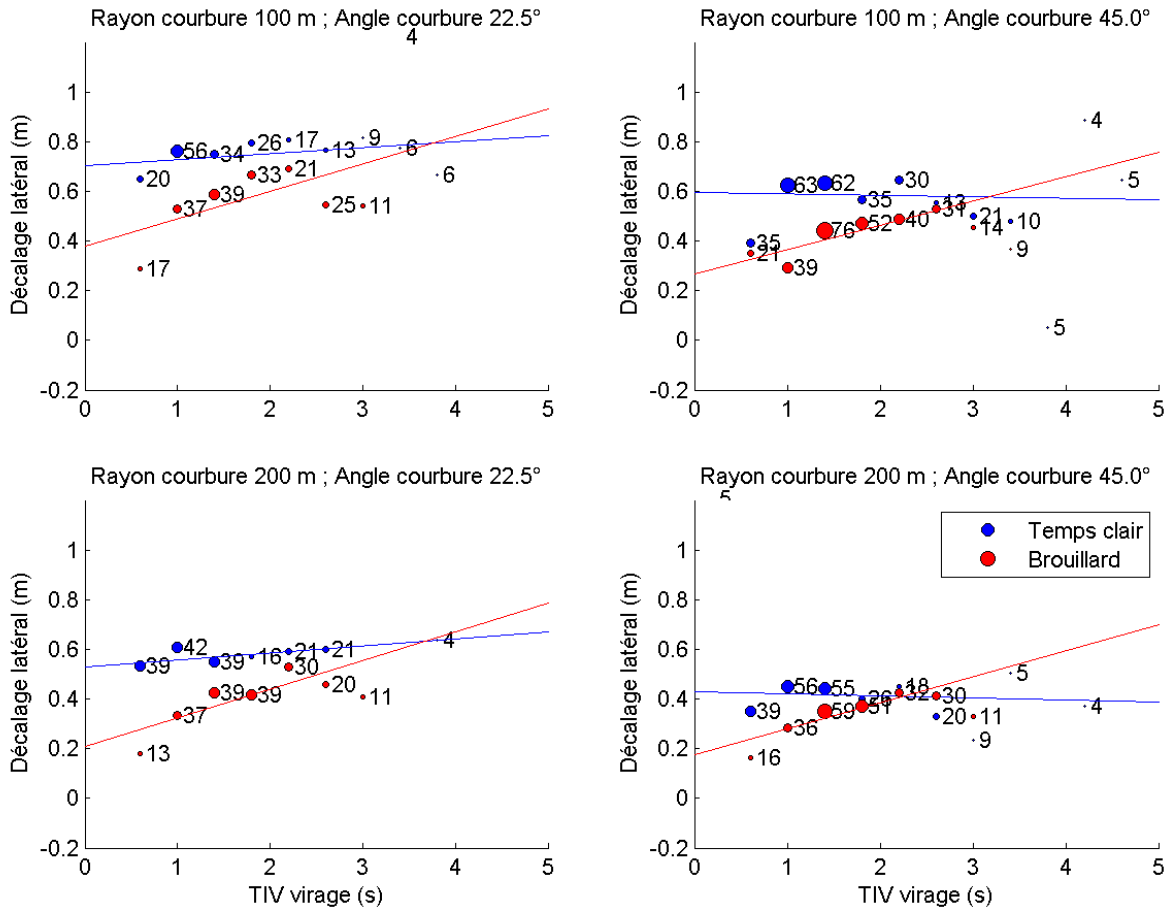


Figure 64 : Décalage latéral moyen en cours de virage (m) en fonction de l'intervalle (s) et de la condition de visibilité. Le 0 sur l'axe des ordonnées correspond à la position latérale moyenne sur le parcours. Les quatre graphiques correspondent à quatre types de virages (Rayon de courbure x Angle de courbure). Les points correspondent à des regroupements de virages qui ont été franchis avec des intervalles proches (par tranches de 0.4 s). La taille des points dépend du nombre de virages qu'ils représentent (nombres indiqués en noir).

Nous avons mené une analyse de variance factorielle sur le décalage latéral pour les quatre types de virages confondus. Les variables catégorielles sont la condition de visibilité (2), et la gamme d'intervalle (4). L'intervalle a été décomposé en quatre catégories : 0 à 1 s, 1 à 2 s, 2 à 3 s, et 3 à 4 s.

L'analyse montre un effet principal de la condition de visibilité ($F(1,1789)=54.6$; $p<.0001$) dans le sens d'un décalage latéral plus important par temps clair ($m=0.56$; $\sigma=0.32$) qu'en condition de brouillard ($m=0.424$; $\sigma=0.336$). Elle montre également un effet principal de la gamme de TIV ($F(3,1789)=26.5$; $p<.0001$), dans le sens d'un décalage latéral plus élevé pour les plus grands TIV. Les tests post-hoc de Newman Keuls montrent que le décalage latéral est plus petit pour la plus petite gamme de TIV (<1 s) que pour les autres ($p<.00025$).

Les moyennes et écarts-types sont les suivants : <1 s : $m=0.402$, $\sigma=0.361$; 1 à 2 s : $m=0.513$, $\sigma=0.307$; 2 à 3 s : $m=0.525$, $\sigma=0.325$; 3 à 4 s : $m=0.527$, $\sigma=0.422$.

Il apparaît également une interaction entre la condition de visibilité et la gamme de TIV ($F(3,1789)=10.9$; $p<.0001$), dans le sens où le décalage latéral est plus petit pour les intervalles courts en condition de brouillard (Figure 65). Les tests post-hoc montrent que le décalage latéral est plus petit en condition de brouillard pour la plus petite gamme de TIV (<1 s) que pour toutes les autres conditions ($p<.0001$). Il est également plus petit en condition de brouillard que par temps clair pour la seconde gamme de TIV (1 à 2 s) ($p<.025$). Les moyennes et écarts-types des conditions impliquées sont les suivants : <1 s clair : $m=0.513$, $\sigma=0.31$; <1 s brouillard : $m=0.203$, $\sigma=0.361$; 1 à 2 s, clair : $m=0.591$, $\sigma=0.305$; 1 à 2 s, brouillard : $m=0.449$, $\sigma=0.294$.

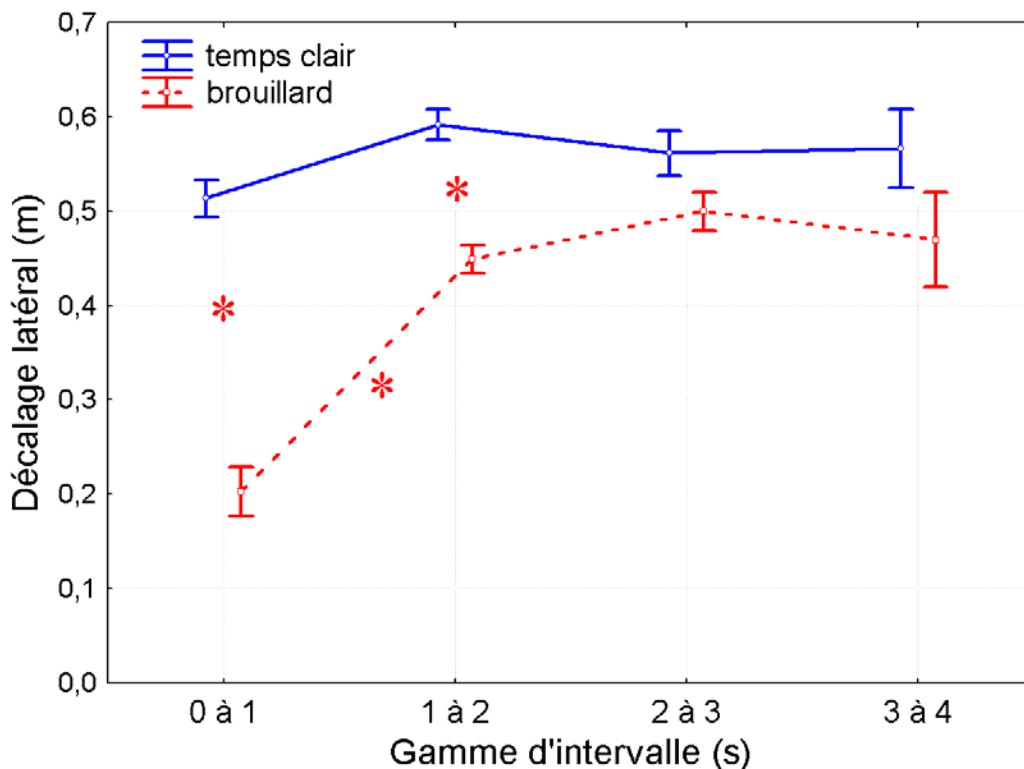


Figure 65 : Décalage latéral moyen en cours de virage (m) en fonction de l'intervalle (s) et de la condition de visibilité. Le 0 sur l'axe des ordonnées correspond à la position latérale moyenne sur le parcours. Correspond aux quatre types de virages confondus (Rayon de courbure x Angle de courbure). Les points correspondent à des regroupements de virages qui ont été franchis avec des intervalles proches (par tranches de 1 s). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p<.05$) avec le test de Newman-Keuls.

3.1.3 *Discussion concernant le décalage latéral en cours de virage*

Le décalage latéral moins important en condition de brouillard que par temps clair confirme les résultats de Tenkink (1987). Une interprétation possible est l'adoption d'une marge de sécurité plus importante en condition de brouillard, du point de vue des écarts latéraux. Un décalage latéral réduit évite en effet de s'approcher du bord de route, et offre ainsi une plus grande tolérance aux erreurs de position latérale. L'anticipation réduite en condition de brouillard empêche de planifier correctement la trajectoire. Il est donc préférable pour les participants d'augmenter la tolérance aux écarts latéraux en coupant moins les virages.

L'analyse de variance montre d'autre part que les participants coupent d'autant plus les virages que le véhicule lièvre est éloigné en condition de brouillard, mais pas par temps clair. Ce résultat va dans le sens de nos hypothèses, et indique que les participants se basent en partie sur la position du véhicule lièvre et/ou sur la trajectoire qu'il a empruntée pour le contrôle de leur trajectoire. On constate cependant que l'influence de l'intervalle sur le décalage latéral en condition de brouillard n'apparaît que pour les intervalles les plus courts. L'analyse montre en effet que lorsque l'intervalle augmente et devient supérieur à 2 s, le décalage latéral en condition de brouillard et par temps clair ne diffèrent plus. L'interprétation que nous proposons est que pour les intervalles supérieurs à environ 2 s, les participants évitent de trop se rapprocher du bord de route en se basant sur les informations fournies par la chaussée. On peut supposer que l'utilisation du véhicule lièvre comme guide vise à anticiper la courbure de la route et constituerait une partie des informations utilisées par le système proactif. La chaussée vue à une certaine distance devrait également pouvoir être utilisée si son contraste est suffisant. La chaussée proche serait utilisée par le système rétroactif, et permettrait de corriger les erreurs de position latérale.

3.2 Le Steering Wheel Reversal Rate comme mesure de la charge mentale

Le Steering Wheel Reversal Rate (SRR) est une mesure basée sur les mouvements de volant. Il s'agit de mesurer le nombre d'inversions du sens de mouvement du volant pour une durée donnée. Plusieurs travaux ont permis de valider le SRR comme mesure de la charge mentale allouée au contrôle de trajectoire (Mac Donalds & Hoffmann, 1980 ; Malaterre, 1994 ; Malaterre et al., 1992). On peut considérer que le SRR est lié à la difficulté du contrôle de

trajectoire dans la mesure où la charge mentale allouée est d'autant plus élevée que le contrôle est difficile.

Mac Donalds et Hoffmann (1980) expliquent également que d'autres facteurs peuvent influencer le SRR. Ils seront donc à prendre en compte pour l'interprétation des résultats. La charge mentale allouée au contrôle de trajectoire sera d'autant plus faible que d'autres tâches seront demandeuses d'attention. Le SRR sera alors d'autant plus bas. Il peut également y avoir un phénomène de saturation lorsque l'attention nécessaire à la réalisation de toutes les tâches est trop élevée. Enfin, le SRR dépend également de "l'habileté" des conducteurs à contrôler la trajectoire. Il est ainsi plus bas pour les conducteurs expérimentés.

La plupart des auteurs ayant mesuré le SRR, l'ont fait sur des routes en ligne droite. Cette mesure se fait alors en comptant le nombre de fois que le volant change de côté par rapport à la position centrale (0°), en utilisant un seuil au delà duquel le changement est pris en compte (correspondant à un hysteresis) (McLean & Hoffmann, 1975). La position centrale sert donc de référence fixe. Pour utiliser cette mesure sur route sinueuse, il est nécessaire d'adapter la méthode tel que l'ont fait Jamson et Merat (2005) et Engström, Johansson, et Östlund (2005). Comme eux, nous avons calculé le SRR en recherchant les extrema locaux, ce qui revient à utiliser un point de référence mobile qui correspond à la déviation maximale du volant depuis le dernier changement de sens. La Figure 66 présente la méthode de mesure classique et la méthode adaptée.

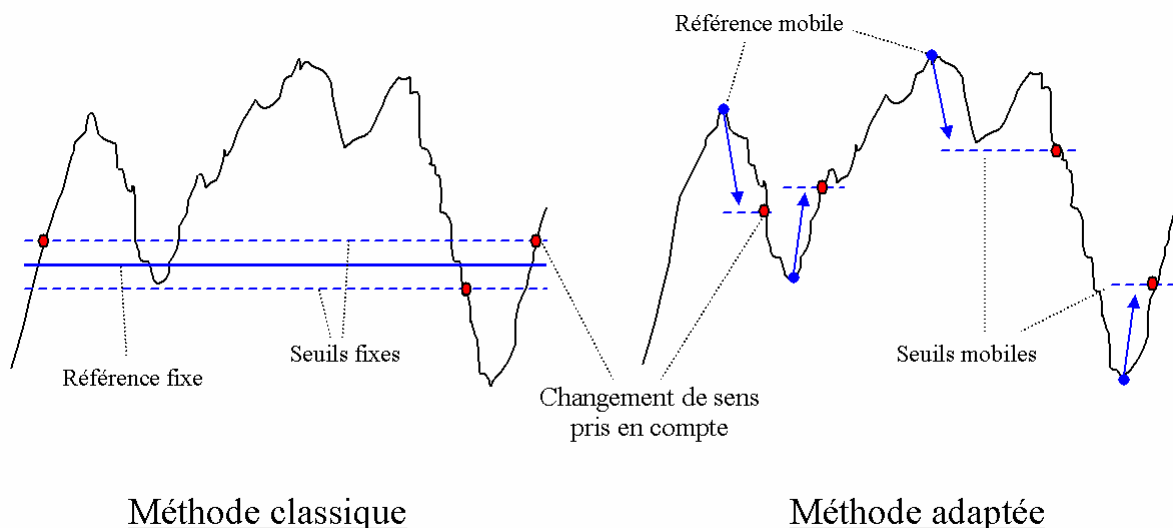


Figure 66 : Méthodes de mesure du steering reversal rate. Gauche : Méthode classique, utilisée en ligne droite (McLean & Hoffmann, 1975). Droite : Méthode adaptée pour route sinueuse à droite. Les courbes noires représentent la position du volant en fonction du temps.

3.2.1 Comparaison des deux méthodes

Nous avons calculé le SRR pour chaque participant sur les parcours en ligne droite avec les deux méthodes. Nous avons alors calculé le coefficient de corrélation entre les deux méthodes de calcul pour les différentes conditions de vitesse et de visibilité. Ce coefficient (R^2) est compris entre 0.87 et 0.92 selon les conditions expérimentales (Tableau 10). Cette bonne corrélation en ligne droite entre les deux méthodes de calcul contribue à valider la méthode adaptée. D'autre part, différentes figures ont été tracées avec les deux méthodes pour les conditions de ligne droite. Les figures sont similaires (à un facteur d'échelle près), et l'influence des variables étudiées y apparaît de la même façon. Etant donné les coefficients de corrélation élevés et la similitude entre les figures, on peut considérer que la méthode adaptée aux routes sinueuses peut se substituer à la méthode de calcul classique. Les figures présentées dans la suite de ce document seront donc basées sur la méthode adaptée.

| R² | Temps clair | Brouillard |
|----------------------|-------------|------------|
| Vitesse 1 | 0.89 | 0.91 |
| Vitesse 2 | 0.90 | 0.87 |
| Vitesse 3 | 0.90 | 0.89 |

Tableau 10 : Coefficients de corrélation entre les SRR calculés par les deux méthodes pour les trois conditions de ligne droite (Vitesses 1, 2, et 3). Les calculs ont été faits avec un seuil de 0.02° (voir ci-dessous).

3.2.2 Choix d'un seuil

Pour calculer le SRR, il est nécessaire de choisir un seuil au-delà duquel le changement de sens du volant sera pris en compte. Les seuils utilisés par McLean et Hoffmann (1975) vont jusqu'à 10° . Le seuil utilisé par Deborne, Barthou, Toffin, Reymond, & Kemeny (2008) est de 2° , et celui utilisé par Jamson et Merat (2005) et Engström, Johansson, et Östlund (2005) est de 1° . Ces seuils correspondent à une mesure de l'angle du volant. Comme nous ne disposons pas directement de cette mesure, nous avons réalisé les calculs sur l'angle de braquage des roues qui est proportionnel à l'angle du volant¹². Le seuil le plus élevé que nous avons testé (braquage des roues de 0.1°) correspond à un angle de volant d'environ 1.8° . Ces faibles valeurs par rapport à celles de la littérature peuvent être expliquées par la sensibilité du volant du simulateur.

¹² Pour information : l'angle de braquage est d'environ 1° pour un virage ayant un rayon de courbure de 200 m, et d'environ 2° pour un virage ayant un rayon de courbure de 100 m.

La Figure 67 présente le SRR en fonction du seuil choisi. Les valeurs élevées pour les seuils les plus faibles (seuil 0.015°) sont dues aux micro-mouvements et au bruit de mesure. Pour ne pas les prendre en compte, il est préférable de choisir un seuil supérieur à 0.015° . Par ailleurs, plus le seuil est élevé, moins il y a d'inversions prises en compte, ce qui rend la mesure moins fiable. Pour les seuils supérieurs à 0.05° , il y a des parcours pour lesquels aucune inversion n'a été prise en compte (en ligne droite). Il est donc souhaitable de rester bien en dessous de cette zone. Un seuil compris entre 0.015° et 0.03° semble satisfaire ces deux contraintes.

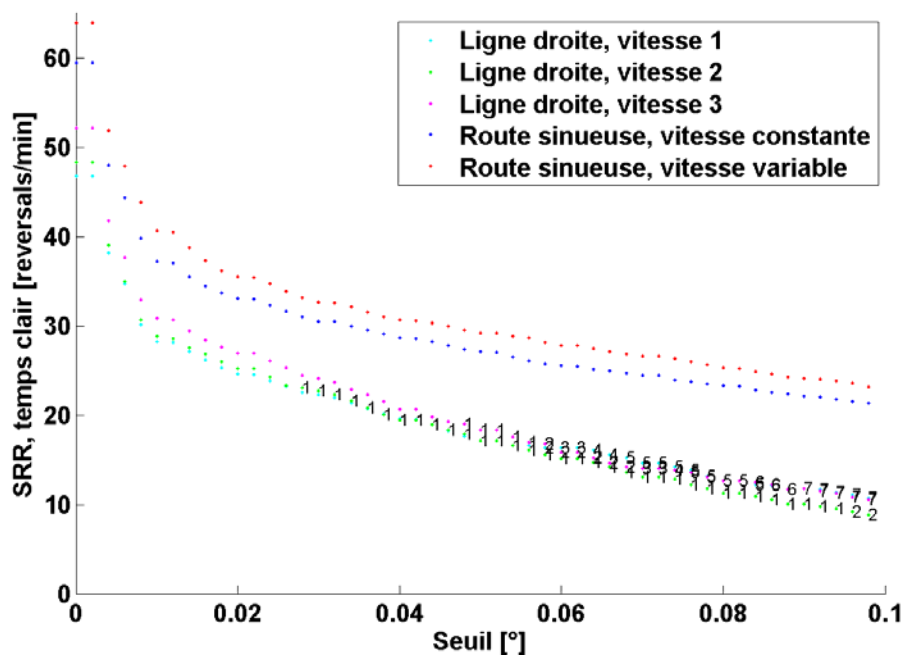


Figure 67 : SRR en fonction du seuil (mesuré sur angle de braquage des roues), pour les 5 conditions de vitesse par temps clair. Pour les seuils les plus élevés, il arrive qu'aucune inversion du sens du volant ne soit mesurée (SRR=0). Lorsque c'est le cas, les participants ne sont pas pris en compte, et un nombre noir placé à côté du point indique le nombre de participants n'ayant pas été pris en compte.

La Figure 68 présente le rapport entre le SRR par temps de brouillard et le SRR par temps clair en fonction du seuil. On constate que ce rapport dépend du seuil, en particulier en ligne droite. Pour que la mesure soit fiable, il faut choisir un seuil autour duquel il y a peu de variations. Une valeur de 0.02° semble convenir tout en satisfaisant les contraintes précédentes. Les autres figures de ce document seront donc basées sur un seuil de 0.02° (angle de braquage des roues), ce qui correspond à un angle de volant de 0.36° . Les effets qui seront présentés apparaissent également pour des valeurs de seuil différentes.

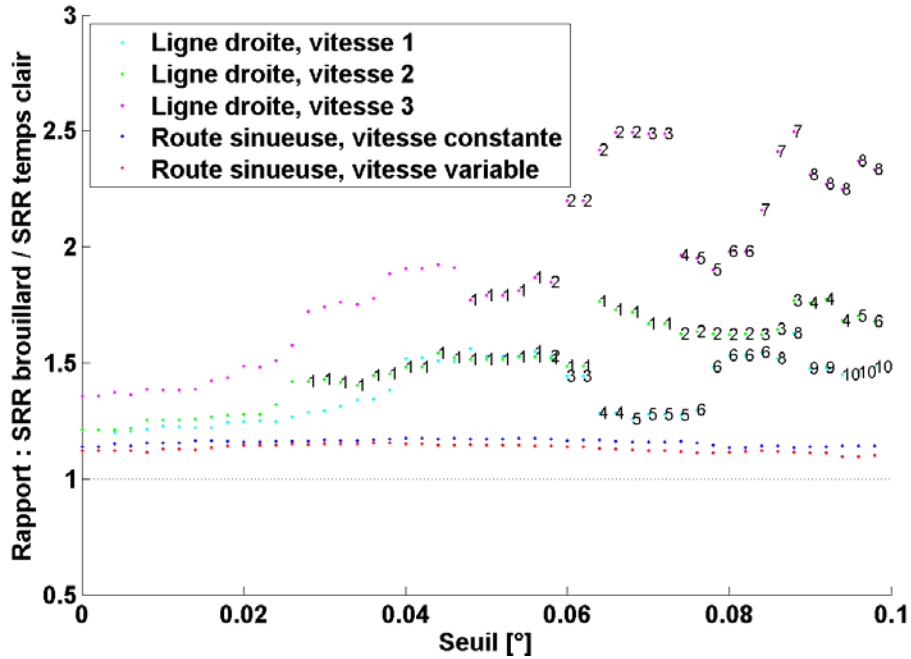


Figure 68 : Rapport entre le SRR par temps de brouillard et le SRR par temps clair en fonction du seuil (mesuré sur angle de braquage des roues), pour les 5 conditions de vitesse. Pour les seuils les plus élevés, il arrive qu'aucune inversion du sens du volant ne soit mesurée (SRR=0). Lorsque c'est le cas, les participants ne sont pas pris en compte, et un nombre noir placé à côté du point indique le nombre de participants n'ayant pas été pris en compte.

3.3 Résultats concernant la charge mentale pour le contrôle de trajectoire

Notre hypothèse concernant la difficulté du contrôle de trajectoire peut être décomposée en deux parties. Nous supposons d'une part que le contrôle de trajectoire est plus difficile en condition de brouillard que par temps clair. Nous supposons d'autre part qu'en condition de brouillard, la difficulté augmente avec la réduction de l'intervalle lorsque celui-ci est inférieur à environ 1 s. La difficulté du contrôle de trajectoire devrait affecter la charge mentale, et pourrait donc être mesurée par le SRR.

3.3.1 *Influence du brouillard*

La Figure 69 permet de comparer le SRR en condition de brouillard et en condition de temps clair. Chaque point correspond à un participant. On constate que la plupart des points sont au-dessus de la diagonale, ce qui signifie que le SRR est plus élevé en condition de brouillard qu'en condition de temps clair.

Chapitre 5 : Contrôle de la trajectoire

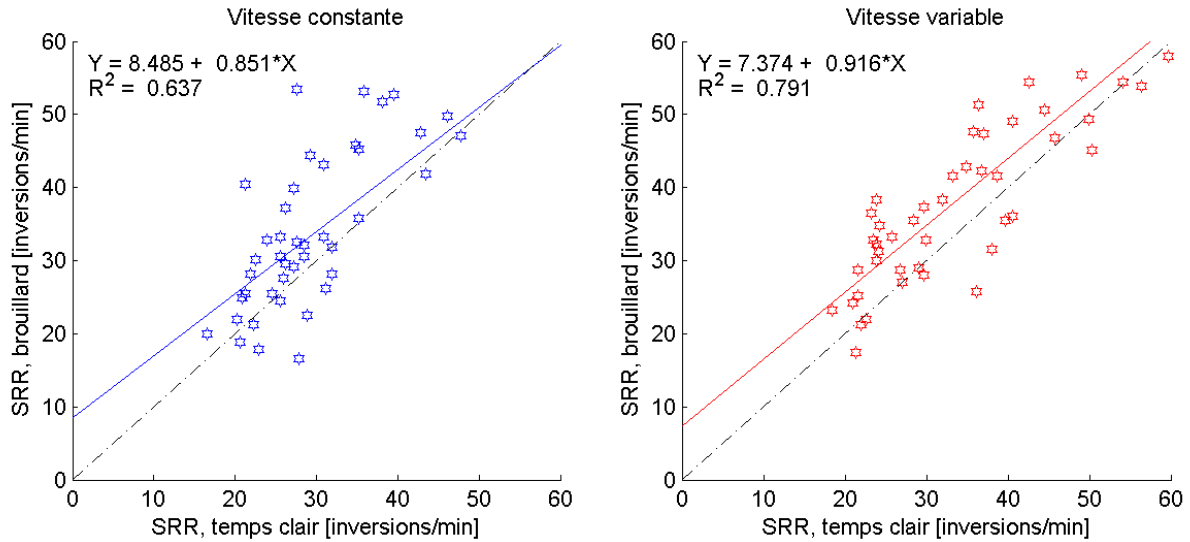


Figure 69 : SRR par temps de brouillard en fonction du SRR par temps clair. Chaque point correspond à un participant. Gauche : Route sinueuse vitesse constante ; Droite : Route sinueuse vitesse variable.

Pour savoir si le brouillard affecte significativement le SRR, nous avons mené une analyse de variance à mesures répétées 2 x 2 (condition de visibilité x condition de vitesse) sur le SRR. Cette analyse fait apparaître un effet principal de la condition de visibilité ($F(1,47)=30.6$; $p<.0001$) (Figure 70-gauche) dans le sens d'un SRR plus élevé en condition de brouillard ($m=38.6$; $\sigma=13.4$) qu'en condition de temps clair ($m=34.3$; $\sigma=12.8$). Il y a également un effet principal de la condition de vitesse ($F(1,47)=10.3$; $p<.0025$) (Figure 70-droite), dans le sens d'un SRR plus élevé à vitesse variable ($m=37.6$, $\sigma=12.7$) qu'à vitesse constante ($m=35.3$, $\sigma=13.7$).

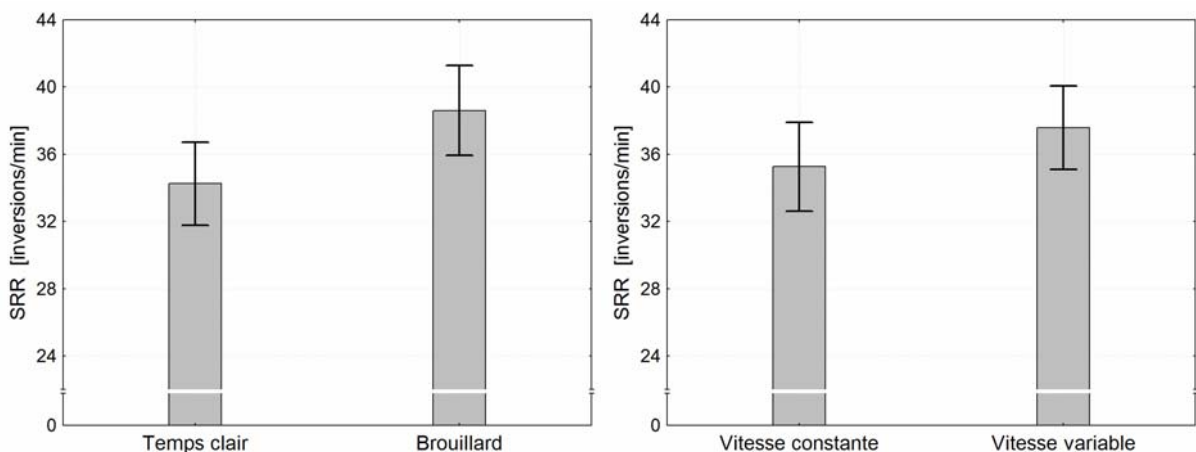


Figure 70 : Gauche : SRR en fonction de la condition de visibilité. Droite : SRR en fonction de la condition de vitesse. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

3.3.2 Influence de l'intervalle ?

Nous venons de voir que le SRR est plus élevé en condition de brouillard que par temps clair. Nous souhaitons d'autre part savoir si en condition de brouillard, le SRR varie avec l'intervalle. Nous avons choisi de calculer le SRR et l'intervalle moyen sur la durée du parcours, ou plus précisément sur la phase expérimentale de chaque parcours. Le calcul de l'intervalle moyen sur une durée de plusieurs minutes peut avoir tendance à masquer d'éventuels effets de l'intervalle, dans la mesure où l'intervalle pratiqué varie autour de sa valeur moyenne. Le calcul du SRR sur la durée du parcours est cependant nécessaire puisque pour être fiable, la mesure du SRR doit être effectuée sur une durée de conduite suffisante.

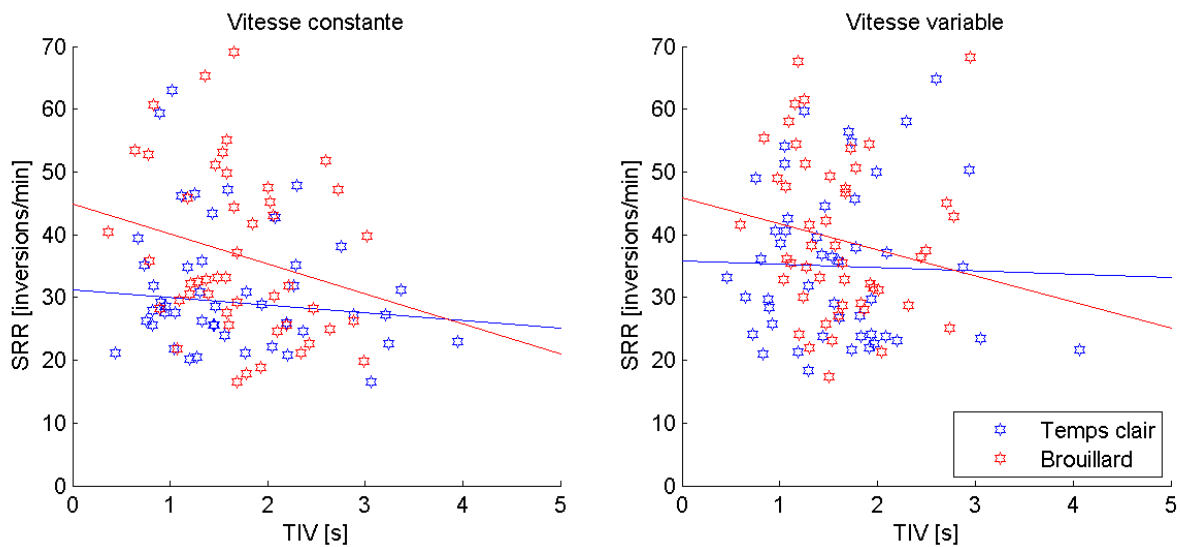


Figure 71 : SRR en fonction de l'intervalle moyen et de la condition de visibilité. Chaque point correspond à un participant. Gauche : Route sinueuse vitesse constante ; Droite : Route sinueuse vitesse variable.

Il semblerait, d'après les droites de régression de la Figure 71, que le SRR ait tendance à augmenter lorsque l'intervalle diminue en condition de brouillard, mais pas par temps clair. Puisque les droites de régression font apparaître une même tendance pour les deux conditions de vitesse, nous avons décidé de les regrouper pour les analyses qui suivent (voir Figure 72).

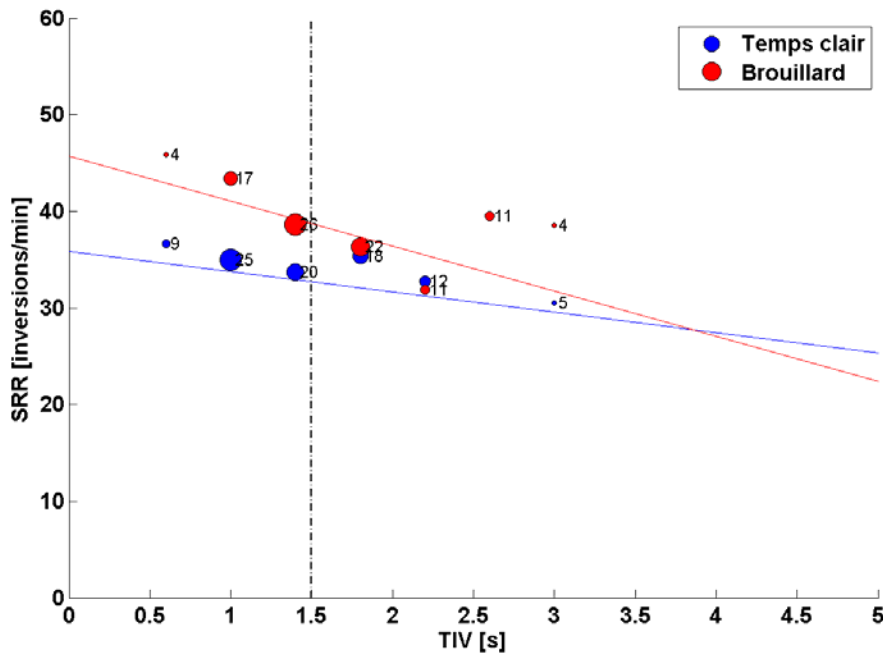


Figure 72 : SRR en fonction de l'intervalle moyen et de la condition de visibilité. Les points correspondent à des regroupements de participants ayant des intervalles moyens proches (points regroupés par tranches de 0.4 s). Les nombres en noir correspondent au nombre de participants regroupés pour chaque point. Les points représentant moins de quatre participants n'ont pas été tracés.

Nous avons mené une analyse de variance factorielle sur le SRR, pour les deux conditions de vitesse confondues. Les variables catégorielles sont la condition de visibilité (2), et la gamme d'intervalle (2). L'intervalle a été décomposé en deux catégories : ceux inférieurs à 1.5 s, et ceux supérieurs à 1.5 s. La valeur de 1.5 s a été choisie de façon à ce que les différentes catégories comportent un nombre de données équivalent. L'analyse montre un effet principal de la condition de visibilité ($F(1,188)=6.51$; $p<.025$) dans le sens d'un SRR plus élevé en condition de brouillard ($m=38.6$; $\sigma=13.4$) que par temps clair ($m=34.3$; $\sigma=12.8$). Elle ne montre en revanche pas d'effet de la gamme de d'intervalle, ni d'interaction entre les deux variables.

3.3.3 Discussion concernant la charge mentale

Ces résultats montrent que le SRR est plus élevé en condition de brouillard que par temps clair. Il passe de 31 inversions par minutes par temps clair à 36 inversions par minutes en condition de brouillard, ce qui peut être interprété comme une charge mentale allouée au contrôle de la trajectoire plus élevée en condition de brouillard que par temps clair. On peut lors d'une première approche supposer que la charge mentale plus élevée en condition de brouillard est due à un contrôle de la trajectoire plus difficile. Il faudra toutefois mettre ces

observations en relation avec un indicateur de performance du contrôle de trajectoire. Nous avons en effet évoqué la relation qui lie la charge mentale et la performance, et cette dernière interprétation présuppose que la performance reste identique ou est détériorée avec le brouillard. D'autre part, les analyses ne montrent pas d'effet de l'intervalle sur le SRR. On peut donc penser que l'intervalle de suivi n'influence pas la difficulté du contrôle de trajectoire. Il faudra également mettre cette observation en relation avec un indicateur de performance.

3.4 Mise au point de mesures de la précision du contrôle de trajectoire

Nous cherchons à mettre au point un indicateur de performance qui permettrait de savoir si les participants contrôlent aussi bien la trajectoire en condition de brouillard que par temps clair. La performance du contrôle de trajectoire est généralement comprise comme la précision avec laquelle la trajectoire est contrôlée. Nous avons donc cherché à mettre au point une mesure de la précision du contrôle de trajectoire qui puisse être utilisée comme indicateur de performance.

La précision du contrôle de trajectoire est le plus souvent mesurée en calculant les écarts latéraux par rapport au milieu de la voie ou par rapport à la position latérale moyenne. Certains auteurs donnent même la consigne explicite de rouler le plus près possible du milieu de la voie (Chatziastros, Wallis, & Bülthoff, 1999 ; Donges, 1978). Il a pourtant été montré que les conducteurs ont tendance à couper les virages, en particulier lorsque leur rayon de courbure est petit (Harms, 1993 ; Tenkink, 1987), ce qui signifie que les conducteurs s'écartent volontairement du milieu de la voie ou de leur position latérale habituelle lorsqu'ils doivent prendre un virage. Cette incohérence nous amène à distinguer les variations volontaires et involontaires de la position latérale, où les variations involontaires sont les écarts de la trajectoire réalisée par rapport à la trajectoire que le conducteur aurait souhaité emprunter. Sur la base de ces éléments, on peut considérer que le contrôle de trajectoire est d'autant plus précis que la trajectoire réalisée est proche de la trajectoire souhaitée. Nous proposons alors la définition suivante de la précision du contrôle de trajectoire :

La précision du contrôle de trajectoire est mesurée par l'écart entre la trajectoire réalisée par un participant et la trajectoire qu'il aurait souhaité emprunter, la précision étant d'autant plus grande que cet écart est petit.

La difficulté sous-jacente pour un tel type de mesure est bien sûr de connaître la trajectoire qu'auraient souhaité emprunter les participants. Parmi les quatre mesures qui ont été étudiées, deux proposent des solutions pour pallier cette difficulté. Une autre mesure étudiée a soulevé les incohérences qui nous ont amenés à proposer cette définition. Enfin une dernière mesure qui sera la première présentée, propose une approche différente qui devrait en principe lui permettre de se détacher de ce problème. Il s'agit du Time to Line Crossing.

3.4.1 *Le Time to Line Crossing*

Le Time to Line Crossing (TLC) est une mesure définie par Godthelp et al. (1984) comme étant le temps restant avant le franchissement des limites de la voie de circulation si aucune action de correction n'est effectuée par le conducteur. Le TLC est une marge de sécurité temporelle qui permet de mesurer la précision du contrôle de trajectoire. Comme pour le TTC (Time To Collision), on s'intéresse en particulier aux valeurs minimales qui correspondent aux situations les plus dangereuses.

Le calcul du TLC tient compte du tracé de la route, de la position du véhicule et de sa vitesse, ainsi que de l'angle de braquage. La prise en compte de l'angle de braquage permet de connaître précisément la trajectoire du véhicule si aucune action n'est faite et donc de savoir à quel endroit il devrait quitter la voie. Une version simplifiée du TLC est parfois utilisée (Deborne et al., 2008 ; Mars, 2006, 2007). Il s'agit de calculer le temps restant avant le franchissement du bord de voie sans tenir compte de l'angle de braquage des roues, i.e. comme si le véhicule allait tout droit. La mesure du TLC telle que définie par Godthelp et al. (1984) n'étant pas disponible, nous avons utilisé la mesure simplifiée pour tester nos hypothèses. Nous nous sommes intéressés en particulier au 5^{ème} percentile du TLC plutôt qu'à sa valeur minimale qui est sujette à plus de variations.

Une analyse de variance à mesures répétées 2 x 2 x 2 (condition de visibilité x rayon de courbure x angle courbure) a été menée sur le 5^{ème} percentile du TLC. Elle fait apparaître un effet principal de la condition de visibilité ($F(1,47)=33.1$; $p<.0001$) allant dans le sens d'un TLC plus bas en condition de brouillard ($m=1.33$ s) que par temps clair ($m=1.39$ s). Elle fait également apparaître un effet principal du rayon de courbure ($F(1,47)=2974$; $p<.0001$) dans le sens d'un TLC plus bas pour les virages serrés ($m=1.14$ s) que pour les virages larges ($m=1.58$ s). Il y a d'autre part un effet principal de l'angle de courbure ($F(1,47)=216$; $p<.0001$) dans le sens d'un TLC plus bas lorsque l'angle de courbure est grand ($m=1.31$ s) que

lorsqu'il est petit ($m=1.41$ s). Il y a enfin une interaction entre ces trois facteurs ($F(1,47)=16.4$; $p<.00025$) (Figure 73). Les tests post-hoc de Newman Keuls montrent que toutes les conditions diffèrent ($p<.05$), sauf les deux conditions suivantes (qu'il n'y a normalement pas lieu de comparer) : Clair-R200-45° et Brouillard-R200-22.5°.

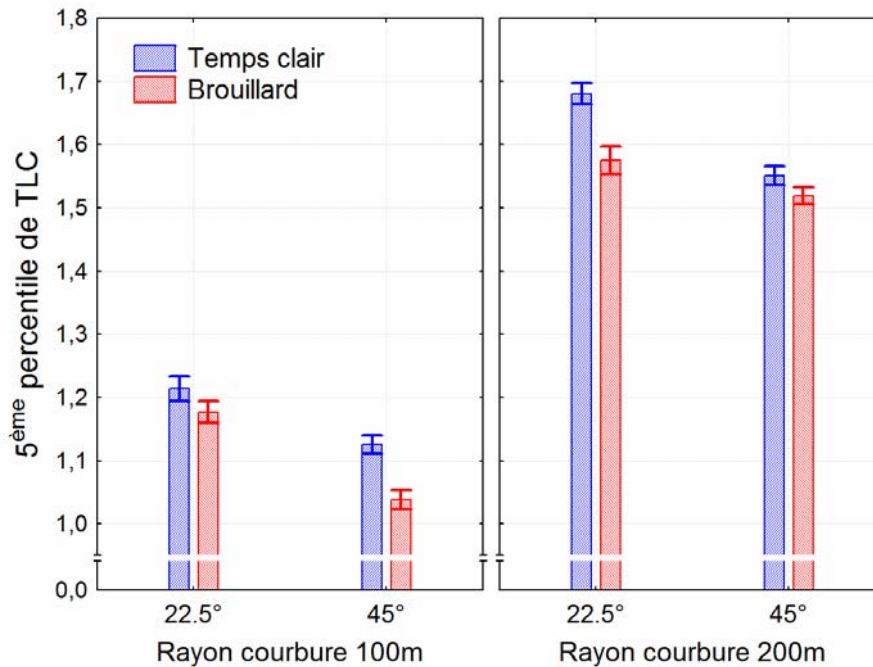


Figure 73 : 5^{ème} percentile du TLC en fonction du rayon de courbure, de la condition de visibilité, et de l'angle de courbure. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

L'analyse de variance montre que le 5^{ème} percentile du TLC est plus petit en condition de brouillard que par temps clair pour les différents types de virages. La marge de sécurité par rapport au bord de voie est donc plus petite en condition de brouillard. Il y a lieu de penser que cet effet peut être expliqué par le comportement général de prise de virage. Si les participants coupent moins les virages en condition de brouillard, alors ils se trouvent plus près du bord extérieur de la voie et le TLC calculé est ainsi plus petit. Nous avons donc cherché à savoir s'il existe un lien entre la façon de prendre les virages et le TLC calculé. La Figure 74 montre le lien entre le 5^{ème} percentile du TLC et le décalage latéral en cours de virage tel qu'il a été défini précédemment (voir Figure 63, page 191). On constate que le TLC est d'autant plus élevé que les participants coupent les virages. Le TLC calculé en ligne droite (i.e. sans tenir compte de l'angle de braquage) n'est donc pas indépendant de la façon dont les participants prennent les virages. Il ne peut donc pas être une mesure fiable de la précision du contrôle de trajectoire dans le sens où nous l'avons défini. Puisque le TLC calculé en ligne

droite ne répond pas à nos attentes, il est nécessaire de s'orienter vers d'autres types de mesures, comme par exemple la variabilité de la position latérale et du cap.

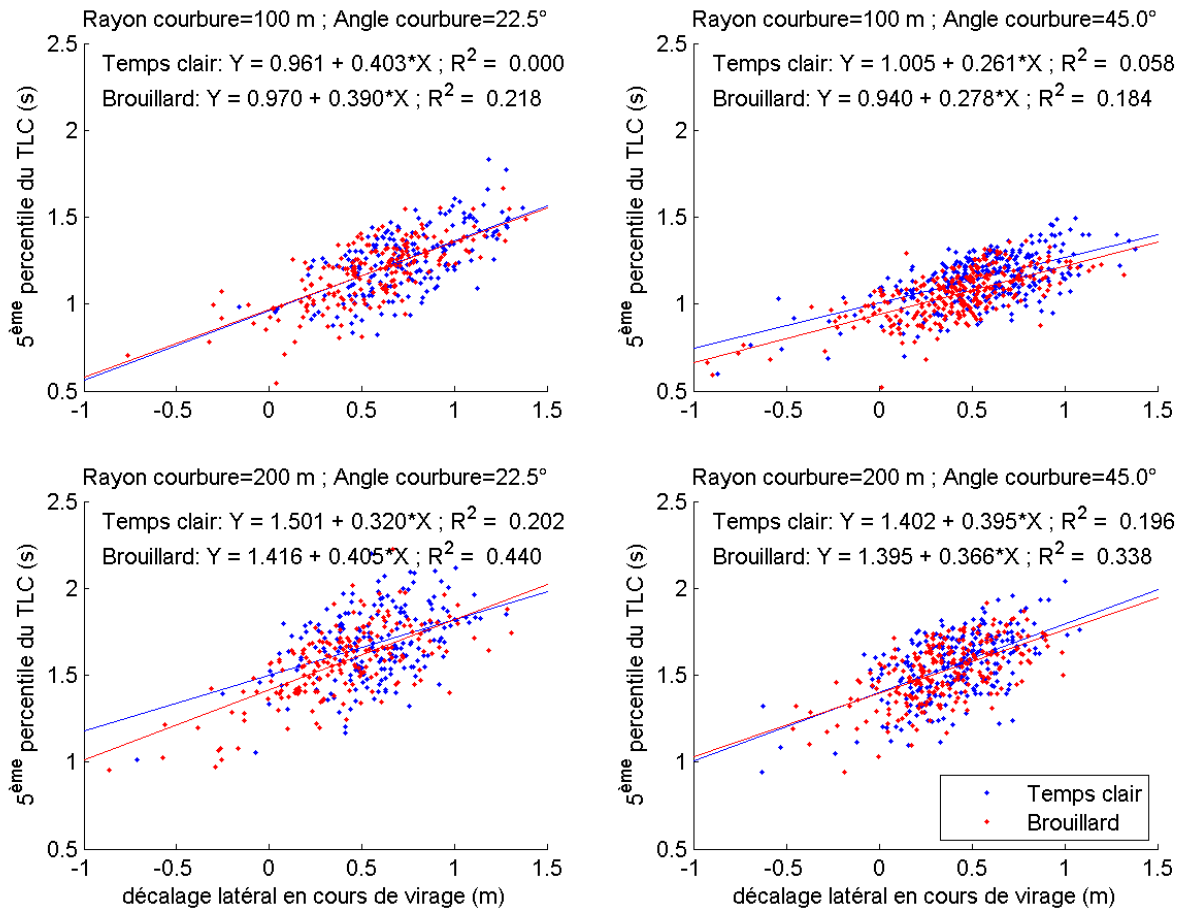


Figure 74 : 5^{ème} percentile du TLC en fonction du décalage latéral en cours de virage, et de la condition de visibilité. Les quatre graphiques correspondent à quatre types de virages (Rayon de courbure x Angle de courbure).

3.4.2 Variabilité de la position latérale et du cap

De nombreux auteurs ayant cherché à étudier la précision du contrôle de trajectoire l'ont fait en calculant la variabilité de la position latérale sur l'ensemble du parcours (e.g. Godthelp et al., 1984 ; Land & Horwood, 1995 ; Mc Lean & Hoffmann, 1973). La plupart de ces travaux ont été réalisés avec des tronçons de route en ligne droite. Certains auteurs ont également étudié le contrôle de trajectoire à travers le cap, qui correspond à l'angle entre l'axe longitudinal du véhicule et l'axiale de la route (e.g. Godthelp et al., 1984 ; Mc Lean & Hoffmann, 1973).

Comme dans la littérature, nous avons calculé l'écart type de la position latérale sur la zone du parcours prise en compte pour les analyses. Une analyse de variance à mesures

répétées 2 x 2 (condition de visibilité x condition de vitesse) a été menée sur l'écart type de la position latérale. Elle montre un effet principal de la condition de visibilité ($F(1,47)=90.6$; $p<.0001$) (Figure 75-gauche) allant dans le sens de variations de la position latérale plus importantes par temps clair ($m=0.47$) qu'en condition de brouillard ($m=0.38$). Elle montre également un effet principal de la condition de vitesse ($F(1,47)=15.4$; $p<.0005$) avec un écart type plus important à vitesse constante ($m=0.44$) qu'à vitesse variable ($m=0.41$). Il n'y a pas d'interaction entre les deux variables. De la même façon, nous avons calculé l'écart type du cap sur la même zone du parcours et une analyse de variance similaire a été menée. Cette nouvelle analyse montre les mêmes effets que celle portant sur la variabilité de la position latérale.

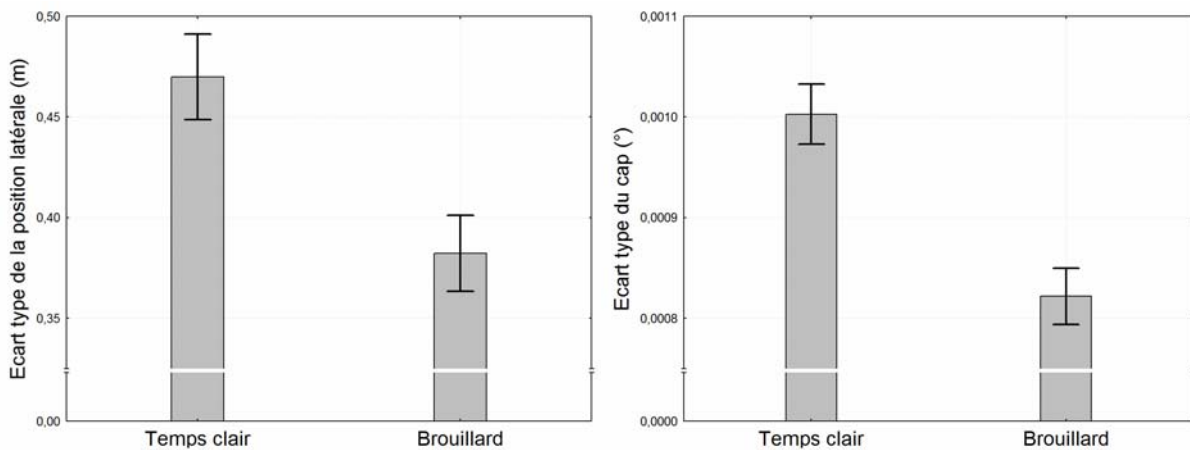


Figure 75 : Gauche : Ecart type de la position latérale (m) en fonction de la condition de visibilité. Droite : Ecart type du cap (°) en fonction de la condition de visibilité. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

La variabilité de la position latérale plus importante par temps clair qu'en condition de brouillard peut être expliquée simplement par la tendance des participants à couper les virages de façon plus importante par temps clair qu'en condition de brouillard (Figure 76). Nous avons déjà évoqué ce phénomène à travers l'étude du décalage latéral en cours de virage. Ce comportement conduit mécaniquement à une variabilité plus importante de la position latérale et du cap lorsque la visibilité est bonne. Il est à préciser que le fait de couper un virage conduit à un écart de la position latérale en milieu de virage, alors que les écarts de cap apparaissent à l'entrée et à la sortie du virage. Ces écarts peuvent être considérés comme volontaires, et ne peuvent donc pas être assimilés à une baisse de la performance du contrôle de trajectoire. C'est cette ambiguïté qui nous a amené à distinguer les variations volontaires et involontaires de la position latérale, et à proposer une définition de la précision du contrôle de trajectoire prenant en compte la trajectoire qu'auraient souhaité emprunter les participants.

Puisque la variabilité de la position latérale et du cap sur l'ensemble du parcours ne sont pas des mesures adaptées à nos besoins, il est nécessaire de les adapter ou d'utiliser d'autres types de mesures.

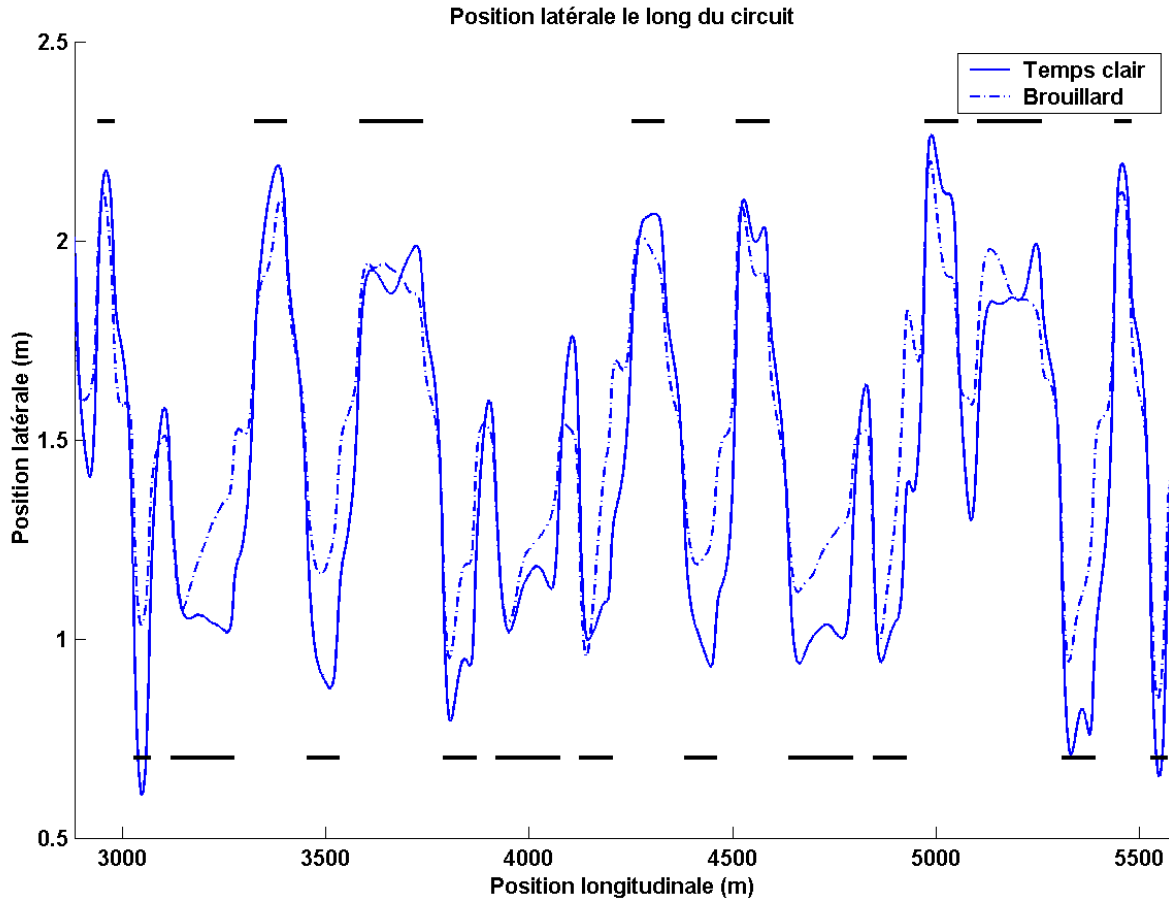


Figure 76 : Position latérale moyenne (moyenne sur les 48 participants) pour la condition de vitesse constante en fonction de la position sur le circuit et de la condition de visibilité. Les segments noirs horizontaux correspondent à la position des virages à gauche (bas) et à droite (haut).

3.4.3 Variabilité inter-virages

La conduite en ligne droite présente peu de contraintes quant à la position latérale adoptée. Au contraire, la prise de virages présente des contraintes fortes. Le fait de couper les virages permet de limiter l'accélération latérale, ce qui est bénéfique pour le confort et la tenue de route. Cette stratégie conduit cependant à réduire la tolérance vis à vis des écarts latéraux. Un écart vers l'intérieur du virage peut être dangereux puisque le véhicule est proche du bord de la voie. De même un écart vers l'extérieur du virage devra être compensé, augmentant ainsi l'accélération latérale et le risque de perte de contrôle. La prise de virage laisse donc peu de marges de manœuvre quant à la trajectoire adoptée, en particulier lorsque la vitesse est élevée. On suppose d'autre part que dans des conditions de conduite identiques (même vitesse et

même visibilité), chaque participant aura tendance à toujours adopter la même trajectoire pour un virage de type donné. Cette tendance devrait être d'autant plus forte que les contraintes mentionnées ci-dessus sont importantes. A partir de ces éléments, on peut supposer que la similarité des trajectoires adoptées par un participant dans des virages de même type sera d'autant plus grande que le contrôle de trajectoire est précis. On suppose au contraire que les trajectoires empruntées seront différentes lorsque le contrôle de trajectoire est peu précis.

Nous avons cherché à mesurer la variabilité de la position latérale en comparant les virages similaires pour un même participant (variabilité inter-virages). Pour cela, nous avons calculé la position latérale dans chaque virage (par rapport à la position latérale moyenne sur le parcours). Ce calcul a été fait sur la même zone que précédemment (Figure 63). Nous avons ensuite calculé l'écart type de la position latérale moyenne pour les virages similaires. On considère comme similaires les virages ayant le même rayon de courbure et le même angle de courbure. Nous n'avons ainsi pas fait de distinction entre les virages à droite et à gauche. Une analyse de variance à mesures répétées $2 \times 2 \times 2$ (condition de visibilité x rayon de courbure x angle de courbure) a été menée sur les données calculées. Elle fait seulement apparaître un effet de l'angle de courbure ($F(1,47)=5.56$; $p<.025$), dans le sens d'une variabilité plus importante lorsqu'il est de 22.5° ($m=0.23$) que lorsqu'il est de 45° ($m=0.21$).

Cette méthode ne fait pas apparaître d'effet du brouillard. Il n'est cependant pas possible de savoir si c'est la méthode qui ne permet pas de faire ressortir des effets existants ou si la précision du contrôle de trajectoire est indépendante du brouillard. Pour tenter de le savoir, nous allons nous intéresser à une autre méthode consistant à mesurer la variabilité de la position latérale en cours de virage.

3.4.4 Variabilité de la position latérale en cours de virage

Comme nous l'avons vu précédemment (Figure 63, page 191), la position latérale en cours de virage semble être décomposée en trois étapes : entrée du virage, puis maintien d'une position latérale stable avec correction des erreurs, et enfin sortie de virage. Nous faisons ici l'hypothèse que la trajectoire que les participants souhaitent emprunter (écart volontaire de position latérale) correspond à une position latérale constante au cours de la seconde étape. Nous supposons de plus, que cette étape correspond pour les virages longs à la zone de calcul telle qu'elle a été définie (Figure 63).

En nous basant à nouveau sur cette hypothèse, nous avons décidé de mesurer la précision du contrôle de trajectoire en calculant l'écart type de la position latérale au cours d'un virage donné. Cette technique de mesure a également été utilisée par Deborne et al. (2008) ainsi que Mars (2006, 2007). Il faut cependant que le virage soit suffisamment long pour faire apparaître cette étape de maintien d'une position latérale constante et pour permettre le calcul d'un écart type. Pour cette raison, nous n'avons considéré que les virages avec un angle de courbure de 45°. Comme précédemment, la zone prise en compte pour le calcul a une longueur de 50 m pour les virages ayant un rayon de courbure de 100 m et une longueur de 100 m pour les virages ayant un rayon de courbure de 200 m (Figure 63). Nous avons calculé pour chaque participant la moyenne des écarts types pour les virages d'une même catégorie, i.e. d'un même rayon de courbure. Puisque cette mesure semble répondre à nos attentes, nous l'avons utilisée pour étudier la précision du contrôle de trajectoire. Les traitements qui ont été effectués sont présentés ci-dessous.

3.5 Résultats concernant la précision du contrôle de trajectoire

Nous avons étudié la précision du contrôle de trajectoire en analysant la variabilité de la position latérale en cours de virage. De plus, seule la condition de vitesse constante a été étudiée puisque la vitesse en cours de virage est susceptible d'influencer la précision du contrôle de trajectoire. Notre hypothèse peut être décomposée en deux parties. Nous supposons d'une part que le contrôle de trajectoire est moins précis en condition de brouillard que par temps clair. Nous supposons d'autre part qu'en condition de brouillard, la précision du contrôle de trajectoire est influencée par l'intervalle, avec un contrôle plus précis lorsque l'intervalle est d'environ 1 s. Les traitements ont donc été réalisés en deux étapes correspondant aux deux parties de cette hypothèse.

3.5.1 Influence du brouillard

Une analyse de variance à mesures répétées 2 x 2 (condition de visibilité x rayon de courbure) a été menée sur l'écart type de la position latérale en cours de virage. Elle fait apparaître un effet principal du rayon de courbure ($F(1,47)=18.2$; $p<.0001$) dans le sens d'une variabilité plus importante pour les virages serrés (Figure 77-gauche). Il n'y a pas d'effet principal de la condition de visibilité ($p=.08$), mais une interaction entre la condition de visibilité et le rayon de courbure ($F(1,47)=9.34$; $p<.005$) (Figure 77-droite) allant dans le sens d'une augmentation de la variabilité avec le brouillard uniquement pour les virages serrés. Les

tests post-hoc de Newman Keuls montrent pour le rayon de courbure de 100 m, que la variabilité de la position latérale est plus importante en condition de brouillard que par temps clair ($p < .0005$). Ils montrent également qu'en condition de brouillard, la variabilité de la position latérale est plus importante pour le rayon de courbure de 100 m que pour celui de 200 m ($p < .0005$).

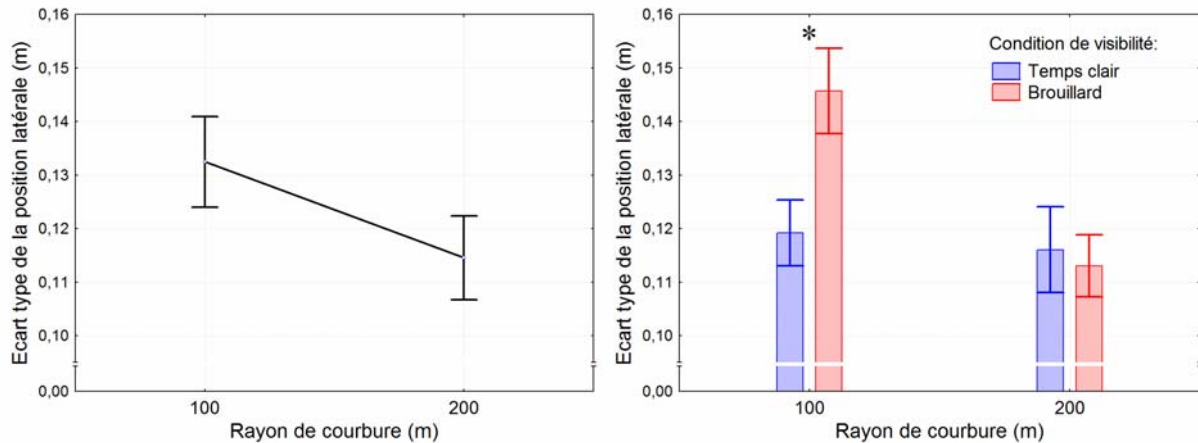


Figure 77 : Gauche : Ecart type de la position latérale en cours de virage (m) en fonction du rayon de courbure. Droite : Ecart type de la position latérale en cours de virage (m) en fonction de la condition de visibilité et du rayon de courbure. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Ces graphiques correspondent aux virages ayant un angle de courbure de 45°. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls.

3.5.2 Influence de l'intervalle ?

Nous venons de voir que le contrôle de trajectoire est moins précis en condition de brouillard uniquement pour les virages serrés. Nous souhaitons maintenant savoir si la précision du contrôle de trajectoire dépend également de l'intervalle. La Figure 78 présente l'écart type de la position latérale en cours de virage en fonction de l'intervalle, et du type de virage. La seule tendance que cette figure fait ressortir est une augmentation de la variabilité avec l'augmentation de l'intervalle pour les virages serrés. Il est en revanche difficile de savoir s'il existe une différence entre les deux conditions de visibilité.

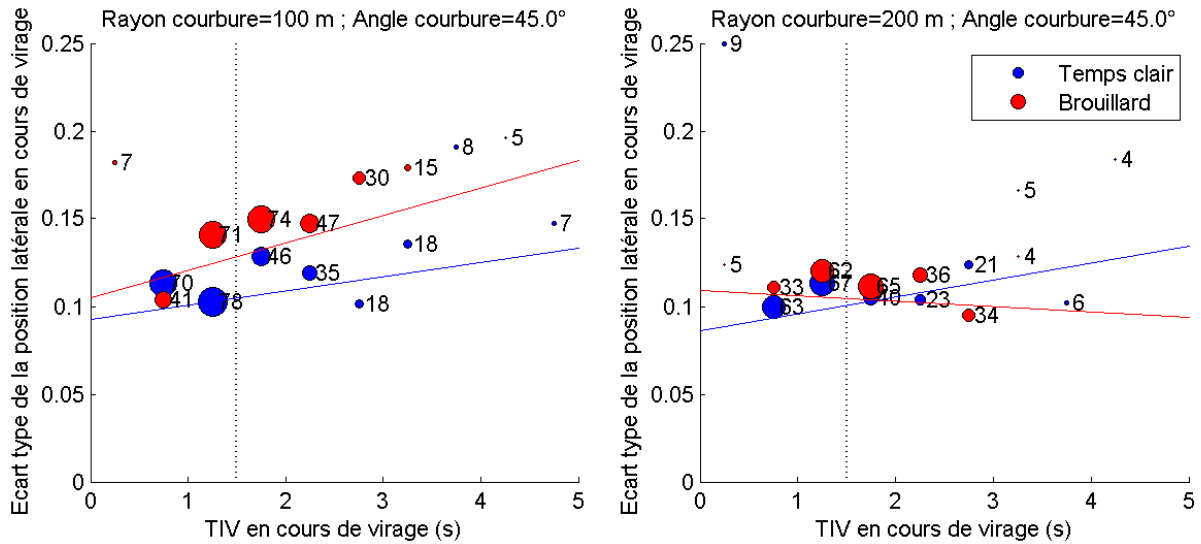


Figure 78 : Ecart type de la position latérale en cours de virage (m) en fonction de l'intervalle (s) et de la condition de visibilité (bleu : temps clair, rouge : brouillard). Ces graphiques correspondent aux virages ayant un angle de courbure de 45°, avec un rayon de courbure de 100 m pour celui de gauche et de 200 m pour ce lui de droite. Les points correspondent à des regroupements de virages qui ont été franchis avec des intervalles proches (par tranches de 0.3 s). La taille des points dépend du nombre de virages qu'ils représentent.

Pour savoir si les tendances observées sur la figure apparaissent de façon significative, nous avons mené une analyse de variance factorielle. La variable dépendante est l'écart type de la position latérale en cours de virage. Les variables catégorielles sont la condition de visibilité (2), le rayon de courbure (2), et la gamme d'intervalle (2). L'intervalle a été décomposé en deux catégories : ceux inférieurs à 1.5 s, et ceux supérieurs à 1.5 s. La valeur de 1.5 s a été choisie de façon à ce que les différentes catégories comportent un nombre de données équivalent.

L'analyse montre un effet principal de la condition de visibilité ($F(1,1048)=4.12$; $p<.05$) dans le sens d'une variabilité plus grande en condition de brouillard ($m=0.131$; $\sigma=0.089$) que par temps clair ($m=0.118$; $\sigma=0.081$) (Figure 79-gauche). Elle fait également apparaître un effet du rayon de courbure ($F(1,1048)=10.1$; $p<.0025$) dans le sens d'une variabilité plus grande pour le rayon de courbure de 100 m ($m=0.132$; $\sigma=0.092$) que pour celui de 200 m ($m=0.115$; $\sigma=0.075$) (Figure 79-droite).

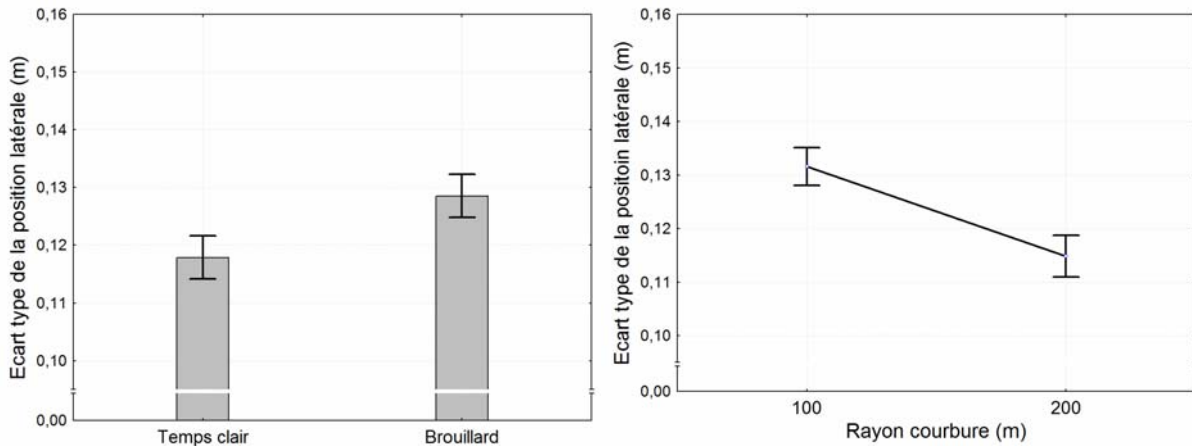


Figure 79 : Gauche : Ecart type de la position latérale en cours de virage en fonction de la condition de visibilité. Droite : Ecart type de la position latérale en cours de virage en fonction du rayon de courbure. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Ces graphiques correspondent aux virages ayant un angle de courbure de 45°, pour la condition de vitesse constante.

Il apparaît également une interaction entre la condition de visibilité et le rayon de courbure ($F(1,1048)=6.25$; $p<.025$), dans le sens où la variabilité augmente avec le brouillard pour les virages serrés (Figure 80-gauche). Les tests post-hoc montrent que la variabilité est plus grande pour le rayon de courbure de 100 m en condition de brouillard que pour les autres conditions ($p<.0005$). Les moyennes et écarts-types sont les suivants : clair-R100 : $m=0.119$, $\sigma=0.078$; clair-R200 : $m=0.116$, $\sigma=0.084$; brouillard-R100 : $m=0.145$, $\sigma=0.103$; brouillard-R200 : $m=0.113$, $\sigma=0.065$.

Il apparaît enfin une interaction entre le rayon de courbure et la gamme de TIV ($F(1,1048)=6.67$; $p<.01$), dans le sens où la variabilité augmente avec l'intervalle pour les virages serrés (Figure 80-droite). Les tests post-hoc montrent que la variabilité est plus grande pour les intervalles longs avec le rayon de courbure de 100 m que pour les autres conditions ($p<.0005$). Les moyennes et écarts-types sont les suivants : TIV court-R100 : $m=0.118$, $\sigma=0.084$; TIV court-R200 : $m=0.116$, $\sigma=0.086$; TIV long-R100 : $m=0.145$, $\sigma=0.097$; TIV long-R200 : $m=0.113$, $\sigma=0.062$.

Cette analyse ne fait pas apparaître d'interaction entre la condition de visibilité et l'intervalle.

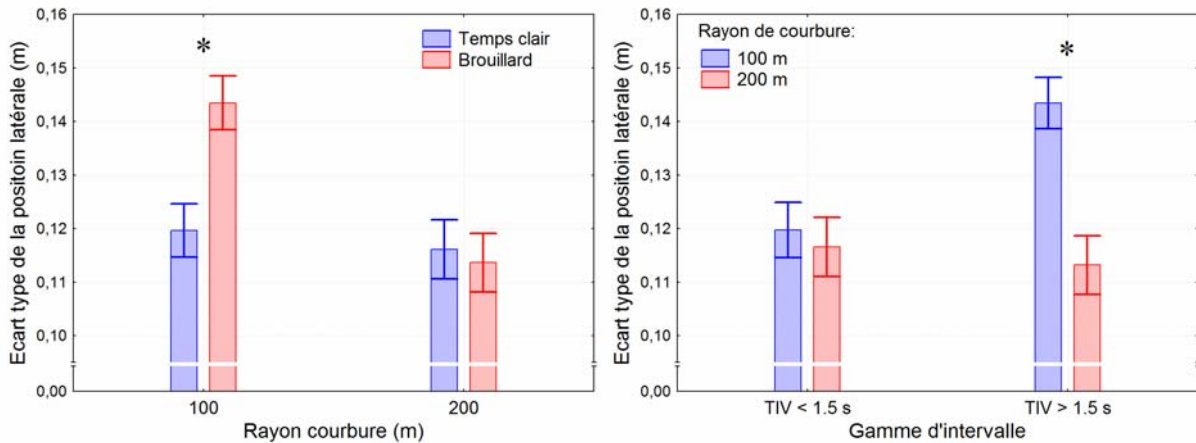


Figure 80 : Gauche : Ecart type de la position latérale en cours de virage en fonction du rayon de courbure et de la condition de visibilité. Droite : Ecart type de la position latérale en cours de virage en fonction de la gamme de TIV et du rayon de courbure. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les étoiles correspondent aux différences significatives ($p < .05$) avec le test de Newman-Keuls. Ces graphiques correspondent aux virages ayant un angle de courbure de 45° , pour la condition de vitesse constante.

3.5.3 Discussion concernant la précision du contrôle de trajectoire

D'après les analyses, nos hypothèses ne sont que partiellement vérifiées. On constate en effet que le contrôle de trajectoire est moins précis en condition de brouillard, mais uniquement dans les virages serrés. Plusieurs auteurs avaient déjà mentionné le contrôle de trajectoire moins précis dans les virages serrés (Godthelp et al., 1984 ; van Winsum & Godthelp, 1996) et une perception moins précise du cap (Warren, Mestre, Blackwell, & Morris, 1991). Ils l'ont expliqué par l'angle de braquage plus grand dans les virages serrés, qui conduit à une erreur plus importante. Le contrôle de trajectoire moins précis dans les virages serrés n'explique cependant pas l'interaction que nous observons avec la condition de visibilité. Le sens de cette interaction est même contraire à ce qui aurait pu être attendu du fait du masquage du point tangent. Nous avons en effet vu qu'en condition de brouillard, le point tangent est masqué pour les virages ayant un grand rayon de courbure alors qu'il reste visible pour les virages serrés. Si la visibilité du point tangent était nécessaire pour contrôler précisément la trajectoire, alors cela aurait conduit d'une part à un contrôle plus précis pour les virages serrés que pour les virages larges en condition de brouillard et d'autre part à un contrôle de trajectoire moins précis en présence de brouillard pour les virages larges. Puisque nous obtenons les effets inverses, on peut penser que la visibilité du point tangent n'est pas un pré-requis au contrôle précis de la trajectoire.

Pour les virages larges, la précision du contrôle de trajectoire n'est pas affectée par le brouillard. Une explication peut être trouvée dans l'effort que font les participants pour

contrôler la trajectoire. L'analyse du SRR nous a en effet montré que les participants faisaient un effort plus important en condition de brouillard que par temps clair pour le contrôle de trajectoire. Il est alors possible que cette augmentation de la charge mentale n'ait pas suffi pas à compenser la difficulté accrue pour les virages serrés. Il y aurait donc bien une interaction entre le rayon de courbure des virages et la condition de visibilité.

Bien qu'inattendue, l'interaction entre le rayon de courbure des virages et la gamme d'intervalles est intéressante. Nous proposons une explication basée sur la direction du regard par rapport à la chaussée. Nous supposons en effet que les participants regardent en direction du véhicule lièvre afin d'assurer le contrôle de l'intervalle. Il faut ici distinguer le fait de regarder le véhicule lièvre pour contrôler l'intervalle et le fait de l'utiliser comme guide pour contrôler la trajectoire. Les résultats précédents montrent que l'utilisation du véhicule lièvre comme guide ne se fait qu'en condition de brouillard (voir Figure 65). Au contraire, l'intervalle doit être contrôlé à la fois par temps clair et en condition de brouillard. Nous supposons donc que quelle que soit la condition de visibilité, le regard doit être porté vers le véhicule lièvre, au moins de façon intermittente. La seconde partie de l'explication proposée consiste à dire que la précision du contrôle de trajectoire dépend de la direction du regard par rapport à la chaussée, et plus précisément par rapport au point tangent, ce qui peut être formalisé de la façon suivante : Le véhicule lièvre se décale d'autant plus vers l'intérieur du virage que l'interdistance est grande. Il se rapproche alors des points que Mars (2006) appelle "inner point" et "innermost point", placés à l'intérieur du virage. Plus précisément, le véhicule se rapproche de ces points dans le sens horizontal, mais se trouve tout de même plus haut dans le champ visuel si l'on considère le sens vertical. Les travaux de Mars montrent justement que le contrôle de trajectoire est moins précis lorsque les participants regardent une cible visuelle située vers l'intérieur du virage.

Pour savoir si cette explication est plausible, nous avons effectué quelques calculs afin de savoir si le véhicule lièvre se trouve réellement au niveau de l'intérieur du virage (dans le sens horizontal) lorsque l'interdistance est grande. Ces calculs prennent en compte le rayon de courbure des virages ainsi que le décalage latéral en cours de virage (Figure 64). On constate en effet que pour les virages serrés ayant un angle de courbure de 45° (virages pris en compte pour l'analyse qui vient d'être présentée), le décalage vers l'intérieur du virage est d'environ 0.6 m par temps clair et d'environ 0.5 m pour les grands intervalles en condition de brouillard. D'autre part, le véhicule lièvre est placé au milieu de la voie. Partant de là, on peut calculer la

distance du point tangent (Tableau 8) et la distance du véhicule lièvre lorsqu'il se trouve visuellement au-dessus du point tangent (Figure 81). La distance du véhicule lièvre serait de 33.4 m (= 14.9+18.5 m, voir Tableau 8) par temps clair, et de 34.1 m (= 15.6+18.5 m) pour les grands intervalles en condition de brouillard. Ces distances visuelles correspondent approximativement à des TIV de 2.1 s lorsque la vitesse est de 16 m/s. On peut donc considérer que le véhicule lièvre est visuellement au-dessus de l'intérieur du virage lorsque l'intervalle est supérieur à environ 2.1 s. On peut alors supposer que le contrôle de trajectoire est moins précis lorsque les participants regardent le véhicule lièvre qui se trouve à une distance suffisante (disons 34 m plus une marge), ce qui semble cohérent avec les données de la Figure 78. Ce phénomène ne se retrouve pas pour les virages larges puisque l'interdistance devrait être supérieure à environ 49.4 m, soit un TIV de 3.1 s. Or, les participants ont rarement adopté des intervalles supérieurs à 3.1 s. Notons que cette situation ne correspond pas précisément aux conditions expérimentales de Mars (2006) puisque le véhicule lièvre se trouve au-dessus du point tangent. Il serait donc intéressant de reproduire l'expérience de Mars, en faisant varier non pas la position latérale mais la distance de la cible visuelle. On pourrait en effet s'attendre à ce que les bénéfices de la cible visuelle sur le contrôle de trajectoire n'apparaissent que pour certaines distances.



Figure 81 : Image représentant le véhicule lièvre au même niveau que le point tangent (dans le sens horizontal), mais plus haut dans le champ visuel. Le rayon de courbure du virage est de 100 m, et l'angle de courbure de 45°.

3.6 Intervalle de suivi : comparaison brouillard/temps clair

Nous avons vu que le véhicule lièvre est utilisé comme guide pour le contrôle de trajectoire en condition de brouillard. Selon les modèles de contrôle de trajectoire et les travaux visant à préciser ces modèles (e.g. Land & Horwood, 1995), on peut penser que l'aide fournie par le véhicule lièvre est plus importante pour certains intervalles. S'il existe effectivement une gamme d'intervalles pour lesquels le contrôle de trajectoire est plus précis ou plus facile en condition de brouillard, alors on peut supposer que les participants auront d'avantage tendance à suivre le véhicule lièvre à ces intervalles en condition de brouillard, comparativement à la condition de temps clair. Pour étudier cette hypothèse, nous avons cherché à comparer les intervalles pratiqués par temps clair et en condition de brouillard.

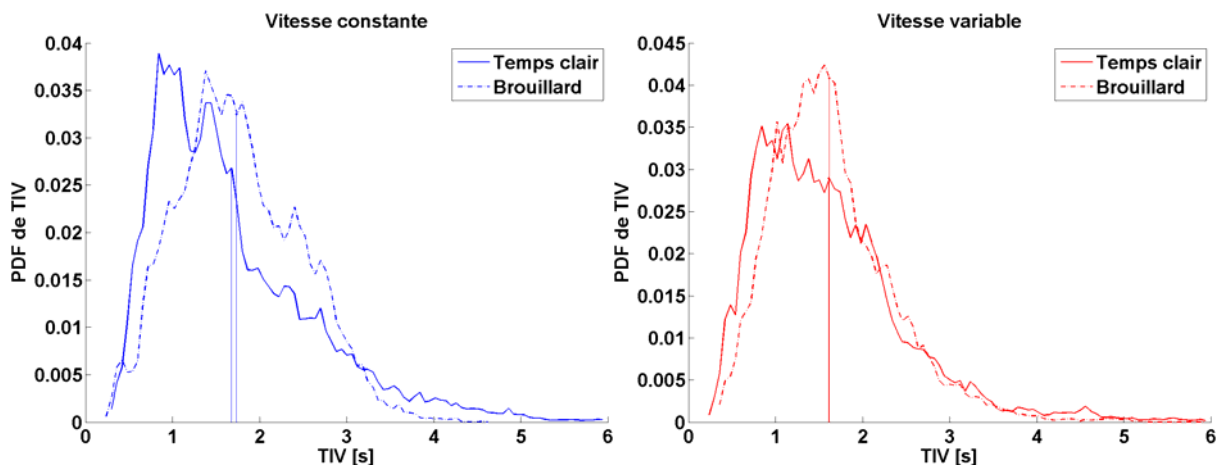


Figure 82 : Fonction de distribution de probabilités (PDF) du TIV pour les 48 participants. Gauche : Condition de vitesse constante. Droite : Condition de vitesse variable. Les barres verticales représentent la valeur moyenne du temps intervéhiculaire.

Nous avons tracé la fonction de distribution de probabilité (PDF) du temps intervéhiculaire pour les deux conditions de route sinueuse (Figure 82). Ce type de tracé permet de savoir quels sont les intervalles auxquels les participants ont passé le plus de temps. La tendance générale est un resserrement des intervalles pratiqués autour d'une zone centrale en condition de brouillard. Il y a en effet moins d'intervalles courts (<1 s) et moins d'intervalles longs (>3 s) en condition de brouillard que par temps clair. Ce resserrement des intervalles pratiqués ne modifie pas l'intervalle moyen (barres verticales). Pour la vitesse constante, l'intervalle moyen est de 1.67 s par temps clair et de 1.73 s en condition de brouillard. Il est respectivement de 1.612 et 1.615 s pour la vitesse variable. On constate d'autre part une augmentation de la valeur des intervalles les plus fréquemment pratiqués (intervalles ayant la probabilité la plus élevée). Pour la vitesse constante, les intervalles les

plus pratiqués sont de l'ordre de 0.8 à 1.5 s par temps clair et de l'ordre de 1.3 à 1.8 s en condition de brouillard. Les valeurs sont similaires pour la condition de vitesse variable.

Nous avons d'autre part cherché à connaître l'influence du brouillard sur l'intervalle pratiqué par les participants de façon individuelle. La Figure 83 présente la proportion des participants qui augmentent et de ceux qui réduisent l'intervalle de suivi en fonction du TIV qu'ils ont adopté par temps clair. On constate que pour la vitesse variable, la convergence des participants vers la zone centrale est présente, tout comme pour les trois conditions de conduite en ligne droite étudiées au chapitre 4 (Figure 54, page 157). En revanche, le phénomène de convergence apparaît moins nettement pour la vitesse constante. On constate notamment que huit participants ayant des intervalles inférieures à 1.5 s par temps clair avec la vitesse constante, adoptent des intervalles encore plus courts lorsqu'il y a du brouillard. A titre de comparaison, ces participants ne sont que deux pour la condition de vitesse variable. De façon similaire, le nombre de participants qui adoptent des intervalles supérieurs à 2 s par temps clair et qui augmentent leur intervalle en condition de brouillard sont cinq pour la condition de vitesse constante alors qu'ils ne sont que deux pour la condition de vitesse variable.

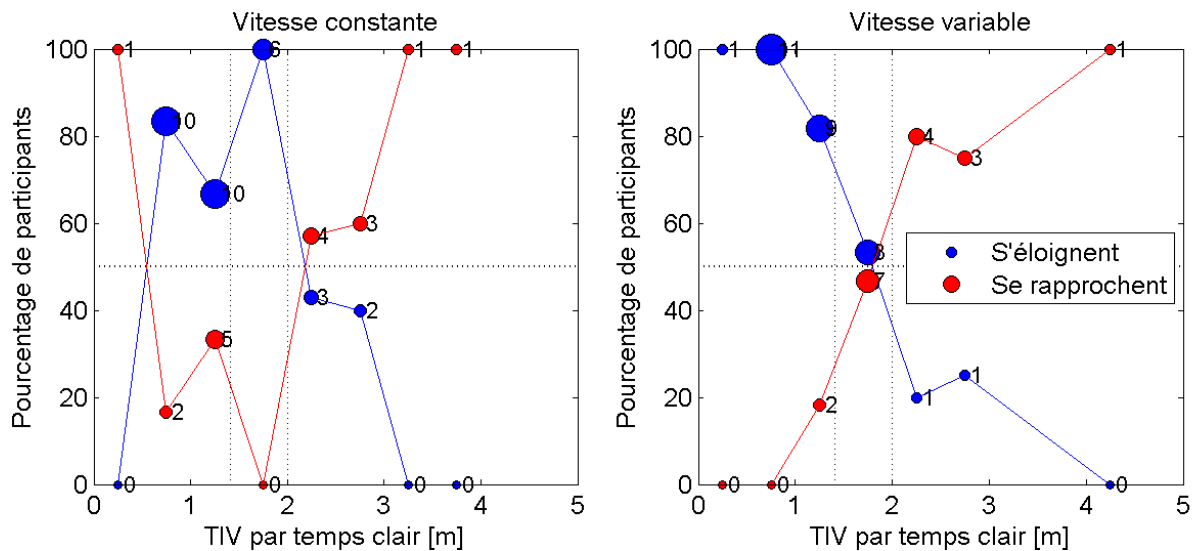


Figure 83 : Proportion des participants qui s'éloignent ou se rapprochent avec le brouillard en fonction de l'interdistance médiane par temps clair. Les points correspondent à des regroupements de participants qui adoptent des intervalles proches par temps clair (par tranches de 0.5 s). Gauche : Condition de vitesse constante. Droite : Condition de vitesse variable.

3.6.1 Discussion concernant l'intervalle de suivi

On constate que les participants passent moins de temps avec un intervalle proche de 1 s en condition de brouillard que par temps clair, en particulier pour la condition de vitesse constante (Figure 82). Il se pourrait donc, contrairement à notre hypothèse, qu'il n'y ait pas de bénéfice à suivre le véhicule lièvre avec un intervalle de l'ordre de 1 s. On peut en revanche se demander si la tendance à suivre le véhicule lièvre avec un intervalle de l'ordre de 1.3-1.8 s en condition de brouillard, est le signe d'un bénéfice autour de cet intervalle.

Par ailleurs, le suivi de véhicule de véhicule sur route sinueuse avec une vitesse variable nécessite à la fois de contrôler la trajectoire et l'intervalle par rapport au véhicule suivi. Il n'est donc pas possible de savoir si la convergence des intervalles pratiqués vers la zone centrale (Figure 83-droite) est liée au contrôle de trajectoire ou au contrôle de l'intervalle comme cela avait été observé au chapitre 4. En revanche lorsque la vitesse du véhicule lièvre est constante, le contrôle de l'intervalle présente peu de difficultés, et le contrôle de trajectoire devient alors la tâche principale. Or, la convergence des intervalles pratiqués vers une zone centrale apparaît de façon moins nette pour la vitesse constante que pour la vitesse variable. On peut donc penser que ce phénomène de convergence est lié au contrôle de l'intervalle et non pas au contrôle de la trajectoire.

4 Discussion concernant le contrôle de la trajectoire

Ce travail met en évidence la difficulté de trouver une mesure fiable de la précision du contrôle de trajectoire, dans le sens d'un indicateur de précision par rapport à la trajectoire que souhaitent emprunter les participants. On considère en effet que les conducteurs ont certains degrés de liberté quant au choix de la trajectoire à emprunter, et que ce choix est indépendant de la précision du contrôle de trajectoire. Plusieurs mesures ont été étudiées mais n'étaient pas indépendantes du type de trajectoire choisie. La mesure qui nous a semblé la plus satisfaisante est la variabilité de la position latérale en cours de virage.

4.1 Principaux résultats concernant le contrôle de la trajectoire

Il semblerait, avec les réserves liées à l'hypothèse sur laquelle se base la mesure utilisée, que le contrôle de trajectoire soit moins précis en condition de brouillard que par temps clair

pour les virages serrés. Ce résultat correspond en partie aux hypothèses qui avaient été formulées, même si nous l'attendions également pour les virages larges.

Nous constatons d'autre part que le contrôle de trajectoire dans les virages serrés est moins précis pour les grands intervalles, à la fois par temps clair et en condition de brouillard. L'interprétation que nous en faisons est que le regard est porté vers le véhicule lièvre afin d'assurer le contrôle de l'intervalle. Ainsi en cours de virage, le regard est d'autant plus porté vers l'intérieur du virage que l'intervalle est grand, conduisant à dégrader le contrôle de trajectoire comme l'avait observé Mars (2006). Notons que la nécessité de porter le regard vers le véhicule lièvre est plus forte en condition de brouillard que par temps clair, puisque le véhicule est alors utilisé comme guide pour le contrôle de trajectoire.

Nous constatons en effet que le véhicule lièvre est utilisé comme guide, ce qui conduit les participants à couper d'autant plus les virages (i.e. à se décaler vers l'intérieur des virage) que l'intervalle est grand, au moins jusqu'aux intervalles de l'ordre de 2 s. Au-delà de cet intervalle, il n'est plus possible de couper d'avantage les virages sans risque de quitter la route.

Par ailleurs, nos hypothèses concernant un éventuel bénéfice à suivre le véhicule de près en condition de brouillard n'ont pas été vérifiées. Nous n'avons en effet observé aucune interaction entre l'intervalle et la condition de visibilité, que ce soit pour la charge mentale ou pour la précision du contrôle de trajectoire. Cette absence d'interaction soulève une question : en quoi l'utilisation du véhicule lièvre comme guide peut-elle être bénéfique, si ce n'est pour faciliter le contrôle de trajectoire ou pour le rendre plus précis ? Peut être qu'il est bénéfique d'utiliser le véhicule lièvre pour le contrôle de trajectoire mais pas uniquement dans une gamme d'intervalles restreinte comme nous l'avions supposé. Une autre hypothèse est que le fait de suivre le véhicule lièvre et de l'utiliser pour le contrôle de trajectoire ait un effet "rassurant" pour le conducteur du véhicule suiveur mais sans être nécessairement bénéfique pour le contrôle de la trajectoire. Nous retrouvons ici le suivi de véhicule sous l'angle des relations sociales, tel que cela avait été abordé par Schönbach (1996).

4.2 Conséquences sur l'intervalle adopté

Nous avons vu que le véhicule lièvre est utilisé comme guide en condition de brouillard. On peut alors se demander quelles en sont les contraintes et les conséquences du point de vue de l'intervalle adopté. Nous ne savons pas précisément par quel mécanisme les participants se

guident sur le véhicule lièvre. Une première possibilité est qu'ils mémorisent et reproduisent la trajectoire empruntée par le véhicule lièvre. Une autre possibilité est que les participants se dirigent vers le véhicule lièvre. Dans les deux cas, l'utilisation du véhicule lièvre comme guide est susceptible d'amener les participants à adopter des intervalles courts en condition de brouillard. En effet, les travaux de Hildreth et al. (2000) laissent penser que la trajectoire ne peut pas être mémorisée sur une durée supérieure à 1.5 s. Ainsi, si l'on suppose que les participants mémorisent la trajectoire empruntée par le véhicule lièvre, il faudrait que le temps intervéhiculaire soit inférieur à 1.5 s pour que la trajectoire puisse être mémorisée. D'autre part, si l'on suppose que les participants se dirigent vers le véhicule lièvre, l'adoption d'un intervalle court en condition de brouillard peut également être bénéfique. En effet, le fait de se diriger vers le véhicule lièvre peut amener les participants à se rapprocher dangereusement des bords de route dans les virages si l'intervalle est trop long (disons supérieur à environ 2 s dans les conditions de cette expérience). Dans ce cas, il leur est nécessaire de corriger la trajectoire en se basant sur les bords de route vus à une distance proche. L'adoption d'un intervalle plus court en condition de brouillard permettrait alors, selon les termes de Malaterre et al. (1991) que "les erreurs de placement soient négligeables". Les intervalles pratiqués lors de notre expérience (Figure 82) semblent à première vue compatibles avec cette seconde interprétation : on observe un resserrement des intervalles les plus fréquemment pratiqués entre 1.3 et 1.8 s. Pourtant, l'influence du brouillard sur les intervalles adoptés par les participants de façon individuelle ne semble pas mettre en évidence de phénomène de convergence lorsque la vitesse est constante (Figure 83-gauche). Le contrôle de trajectoire ne semble donc pas influencer les intervalles adoptés par les participants en condition de brouillard, ou pas suffisamment pour qu'on puisse l'observer.

Enfin, on observe clairement un phénomène de convergence lorsque la vitesse du véhicule lièvre est variable alors qu'on ne l'observe pas lorsque sa vitesse est constante (Figure 83). Le fait que le phénomène de convergence n'apparaisse que lorsque le véhicule lièvre a une vitesse variable, signifie que ce phénomène est directement lié au contrôle de l'intervalle, comme nous l'avons mis en évidence au chapitre 4.

Chapitre 6 : Discussion générale et conclusions

Au terme de ce travail, nous rappelons brièvement le contexte applicatif ainsi que notre problématique de recherche. Nous présentons ensuite une synthèse des principaux résultats obtenus avant de discuter des apports et des limites de ces travaux ainsi que des perspectives pour de futures recherches.

5 Pourquoi des intervalles réduits en temps de brouillard ?

Ce travail avait pour objectif de mieux comprendre le comportement des conducteurs lors de la conduite en file par temps de brouillard. Nous avons plus spécifiquement cherché à comprendre ce qui amène ces conducteurs à réduire leurs intervalles de suivi par rapport à la condition de visibilité normale. Plusieurs études de trafic ont en effet montré que les conducteurs adoptent des intervalles plus courts en condition de brouillard qu'en condition de visibilité normale (Bulté, 1985; Hawkins, 1988 ; White & Jeffery, 1980).

Pour comprendre ce qui amène les conducteurs à réduire leurs intervalles par temps de brouillard, nous nous sommes intéressés aux facteurs liés à la perception et au contrôle de l'intervalle, ainsi qu'au contrôle de la trajectoire. Plusieurs hypothèses liées à ces trois aspects avaient été avancées. Selon Brown (1970), Malaterre et al. (1991) et Reinhardt-Rutland (1992), les interdistances seraient surestimées en condition de brouillard, ce qui amènerait les conducteurs à suivre le véhicule lièvre de plus près. L'hypothèse sous-jacente est que l'interdistance adoptée par les conducteurs dépend de l'interdistance qu'ils perçoivent, et qu'une distorsion de la perception se répercute sur l'interdistance adoptée. Une seconde hypothèse porte sur la sensibilité au mouvement relatif. Selon White et Jeffery (1980), en condition de visibilité réduite les conducteurs chercheraient à obtenir des indices visuels sur la décélération du véhicule lièvre en suivant ce dernier de plus près. Plus particulièrement, nous avons fait l'hypothèse que le brouillard réduit la sensibilité au mouvement relatif et que, pour maintenir cette sensibilité au même niveau que par temps clair, les conducteurs réduisent l'intervalle par rapport au véhicule suivi. Enfin, autre registre d'explication, Malaterre et al. (1991) considèrent que le véhicule lièvre est utilisé pour le contrôle de la trajectoire. Il serait

alors nécessaire de le suivre de près pour éviter les erreurs de placement sur la chaussée. Pour répondre à ces questions, nous avons mené une série d'expérimentations sur simulateur, utilisant des tâches de jugement perceptif et des tâches de conduite.

5.1 Hypothèse d'une surestimation des interdistances

La perception des distances égocentrées peut être vue comme la fusion des différentes informations de distance disponibles, où les informations fiables sont prises en compte de façon prépondérante et les informations peu fiables sont peu, voire pas du tout, prises en compte (e.g. Cutting & Vishtone, 1995 ; Landy & al., 1995). L'une des informations de distances, la perspective aérienne, est due à la diffraction de la lumière par les particules de l'atmosphère. En condition de brouillard, cette information indique de plus grandes distances puisque les gouttelettes d'eau en suspension diffractent la lumière de façon importante. On peut donc s'attendre, d'après les modèles de fusion d'informations, à ce que les distances égocentrées soient surestimées par temps de brouillard à cause de l'effet plus prononcé de la perspective aérienne. C'est effectivement ce qu'observe Ross (1975), avec des objets cibles non familiers.

Contrairement à la situation étudiée par Ross (1975), l'environnement routier donne accès à plus d'informations, et notamment la taille familière. Plusieurs études ont été menées pour savoir si l'interdistance est surestimée en condition de brouillard malgré la présence de ces informations (Beaudoin, 2002 ; Buchner et al., 2006 ; Cavallo et al., 1999, 2000, 2001, 2002, 2007). La majorité de leurs résultats se conforme aux modèles de fusion, dans le sens où les interdistances sont fortement surestimées lorsque peu d'informations fiables permettent de limiter cette surestimation. Les principaux résultats issus de ces études indiquent une surestimation importante de l'interdistance lorsque ni la silhouette du véhicule lièvre ni la chaussée ne sont visibles (Cavallo et al., 2000, 2001, 2002). On notera que dans ces conditions, la surestimation est plus importante avec du brouillard nocturne (60%) qu'avec du brouillard diurne (25%). Ces travaux montrent en revanche que les surestimations sont atténuées ou disparaissent lorsque des informations supplémentaires sont disponibles. La visibilité de la chaussée, donnant accès aux gradients de texture, permet de réduire nettement la surestimation (Cavallo et al., 2007) et la visibilité de la silhouette, donnant accès à l'information de taille familière, permet de supprimer totalement la surestimation (Cavallo et

al, 2000, 2002). Malgré cet ensemble cohérent de résultats, Beaudoin (2002) montre une sous-estimation des interdistances en condition de brouillard.

Pour déterminer l'origine de ces résultats contradictoires et pour préciser les conditions où les interdistances sont surestimées, ce qui est dangereux en termes de sécurité routière, nous avons mené deux expérimentations. Ces deux expériences ont permis d'étudier un certain nombre de variables et de paramètres : visibilité de la silhouette du véhicule cible et de la chaussée, complexité de l'environnement, nombre de feux de brouillard, couleur du véhicule cible, couleur du brouillard, gamme d'interdistances, ainsi que le caractère statique ou dynamique de la simulation. L'une de ces expériences, étudiant une gamme d'interdistances courtes, confirme les résultats de Cavallo et al. (2000, 2001, 2002, 2007). Elle montre en effet une surestimation des interdistances en condition de brouillard. Cette surestimation est d'autant plus prononcée que peu d'informations fiables sont disponibles. Au contraire l'autre expérience, étudiant une gamme d'interdistances longues, va dans le sens des résultats de Beaudoin (2002) en montrant une sous-estimation d'autant plus prononcée que peu d'informations fiables sont disponibles.

L'ensemble de ces résultats ne peut pas être expliqué par une distorsion de la perception des interdistances causée par la perspective aérienne. La perspective aérienne plus prononcée en condition de brouillard devrait en effet conduire à une surestimation des interdistances, indépendamment de la gamme d'interdistances étudiées. A partir de cet ensemble de résultats, nous proposons une explication alternative dérivée de la *Specific-distance tendency* observée par Gogel et Tietz (1973). Les auteurs constatent qu'en l'absence d'informations de distance, les observateurs ont tendance à estimer la distance égocentrée d'un objet à environ 2 m. Cela signifie que la distance des objets plus proches est surestimée et que celle des objets plus éloignés est sous-estimée. Nous faisons l'hypothèse qu'un phénomène similaire existe concernant l'estimation de l'interdistance mais que la distance spécifique vers laquelle tendent les estimations serait de l'ordre de 20 à 30 m. Ce phénomène pourrait être du aux attentes des participants dans un contexte donné. Selon cette hypothèse, les participants se sont attendus lors de ces expériences, à ce que le véhicule soit placé à une interdistance "moyenne", de l'ordre de 20 à 30 m. Nous supposons enfin que la cohérence des estimations pour les essais successifs est assurée par des mécanismes cognitifs.

Notre question de départ était de savoir si la réduction des intervalles en condition de brouillard peut être expliquée par une surestimation des interdistances. L'ensemble des

résultats dont nous disposons montre que les interdistances ne sont surestimées que dans des conditions de brouillard extrêmement dense qui ne sont que très rarement rencontrées en situation réelle. De plus, même en se plaçant dans les conditions de brouillard propices à une surestimation des interdistances (i.e. un brouillard nocturne très dense), la surestimation ne serait que de faible amplitude pour deux raisons. La première raison est qu'il est nécessaire de voir un minimum l'environnement pour pouvoir conduire, et que les informations disponibles dans l'environnement (e.g. gradients de texture liés à la chaussée) réduisent largement la surestimation. La seconde raison est liée à un effet de mémorisation des informations qui étaient disponibles antérieurement, e.g. la position des feux de brouillard à l'arrière du véhicule cible. Une surestimation des interdistances en situation de conduite réelle est donc très peu probable, et le cas échéant, elle serait de faible amplitude. La réduction des intervalles en condition de brouillard ne peut donc pas être expliquée par une perception erronée des interdistances. Dès lors, nous nous sommes intéressé à la seconde hypothèse mentionnée précédemment, liée au seuil de perception du mouvement relatif.

5.2 Hypothèse d'une réduction de la sensibilité au mouvement relatif

En référence à White et Jeffery (1980), nous avons fait l'hypothèse que le brouillard réduit la sensibilité au mouvement relatif et que, pour maintenir cette sensibilité au même niveau que par temps clair, les conducteurs réduisent l'intervalle par rapport au véhicule suivi. De nombreux travaux ont effectivement montré que la sensibilité au mouvement relatif est d'autant meilleure que l'interdistance est courte (e.g. Duckstein et al., 1970). D'une façon plus générale, plusieurs auteurs proposent un modèle selon lequel le mouvement relatif est perçu après que la taille angulaire du véhicule cible ait varié d'une certaine proportion¹³ (e.g. Duckstein et al., 1970 ; Evans & Rothery, 1974 ; Mortimer, 1971). Néanmoins, ce modèle ne rend pas compte de la meilleure sensibilité au mouvement relatif lorsque l'écartement entre les feux arrière est important, et donc lorsque la vitesse angulaire est plus grande (Janssen et al., 1976). Ce modèle ne rend pas non plus compte de l'influence de l'environnement. Il a notamment été observé un effet différentiel entre l'éloignement et le rapprochement (favorisant la perception de l'éloignement), qui s'explique par l'orientation respective des vecteurs vitesse du flux optique global et du flux optique local (Boer, 1999b ; Santos et al., 2000, 2002).

¹³ Ce modèle correspond à un rapport de Weber sur la taille angulaire du véhicule cible.

Bien que la sensibilité au mouvement relatif ait été largement étudiée, aucune étude n'a porté sur l'effet du brouillard. Les deux expériences que nous avons réalisées sur simulateur de conduite (paradigme de temps de réponse) montrent que le brouillard simulé détériore effectivement la sensibilité au mouvement relatif. Deux mécanismes ont été identifiés. Lorsque la silhouette du véhicule cible est peu visible, c'est le faible contraste entre la silhouette et le fond qui réduit la sensibilité. En revanche, lorsque la silhouette du véhicule cible est totalement masquée par le brouillard et que seuls les feux arrière restent visibles, la sensibilité réduite peut être attribuée au faible écartement des deux feux qui réduit la taille angulaire comparée à celle de la silhouette, et diminue ainsi la vitesse angulaire.

Par ailleurs, la réduction de la sensibilité avec le brouillard est plus prononcée lorsque le véhicule lièvre s'éloigne que lorsqu'il se rapproche, par un effet combiné de deux phénomènes. D'une part, nous observons en condition de visibilité normale, une interaction entre le flux optique global issu de l'environnement et le flux optique local issu du véhicule lièvre. Cette interaction, similaire à celle observée par Santos et al. (2000), favorise la détection de l'éloignement (vecteurs vitesse en sens inverse) et empêche la détection du rapprochement (vecteurs vitesse dirigés dans la même direction). En revanche, le brouillard dense supprime le flux optique environnemental ; la perception du rapprochement est alors plus facile que celle de l'éloignement à cause de la plus grande vitesse angulaire.

Concernant notre question de départ, nous avons vu que le brouillard réduit la sensibilité au mouvement relatif lorsque la silhouette du véhicule cible est peu ou pas visible, i.e. pour les plus grandes interdistances. La réduction des intervalles par temps de brouillard peut donc être comprise comme une adaptation de la part des conducteurs face à cette perception dégradée du mouvement relatif. Les conducteurs susceptibles d'adopter cette stratégie pourraient être ceux pour lesquels l'intervalle préférentiel ne permet pas de voir correctement la silhouette du véhicule lièvre en condition de brouillard. Plus spécifiquement, une réduction de l'intervalle conduit à un gain particulièrement important lorsque l'intervalle préférentiel d'un conducteur est dans la zone de transition entre les conditions de bonne et de mauvaise visibilité de la silhouette.

Si le gain perceptif suite à la réduction de l'intervalle dans cette "zone de transition" est susceptible d'apporter un bénéfice du point de vue d'une régulation fine de l'intervalle avec le véhicule suivi, il est plus difficile d'évaluer les conséquences en termes de sécurité. L'intervalle de suivi peut être considéré comme une marge de sécurité (van der Hulst,

Rothengatter, & Meijman, 1998), et sa réduction comme une augmentation du risque de collision. Nos résultats montrent que dans les conditions les plus favorables, la diminution du temps de détection d'un changement d'interdistance peut compenser la réduction du TIV (Temps Intervéhiculaire). Il reste cependant difficile de peser le poids respectif de l'avantage d'une meilleure sensibilité au mouvement relatif et de l'inconvénient d'une réduction de l'intervalle, tant la diversité des situations réelles et le nombre de facteurs à prendre en compte rendent le problème complexe. Si l'on fait abstraction de facteurs liés à la charge attentionnelle ou de facteurs motivationnels de prise de risque, un modèle basé sur des facteurs perceptifs et intégrant les temps de réponse enregistrés dans la présente expérience démontre l'intérêt d'une réduction de l'intervalle par temps de brouillard (Boer, Caro, & Cavallo, 2007, 2008). En effet, la simulation numérique basée sur ce modèle met en évidence une régulation plus fine de l'interdistance dans le brouillard lorsque l'intervalle est court, se traduisant par une augmentation des interdistances minimales et une réduction des situations dangereuses.

5.3 Hypothèse d'une compensation de la sensibilité réduite au mouvement relatif

Le contrôle de l'intervalle fait l'objet de différents modèles. Le modèle *Action Point* décrit par Brackstone et McDonald (1999) et Brackstone, Sultan, et McDonald (2002) est basé sur des seuils de perception du mouvement relatif. Les auteurs considèrent que les conducteurs maintiennent une accélération constante jusqu'à ce que l'un des seuils perceptifs de leur modèle soit dépassé, et réagissent alors en accélérant ou en décélérant. Au contraire, d'autres modèles sont basés sur les grandeurs perceptives (e.g. expansion/contraction angulaire du véhicule lièvre) mais ne tiennent pas compte des seuils perceptifs (e.g. Sauer & Andersen, 2007). Il semblerait par ailleurs, par opposition au modèle de Brackstone et McDonald (1999), que les conducteurs ne cherchent pas à contrôler l'intervalle de façon optimale mais plutôt à le maintenir dans une fourchette d'acceptabilité (Boer, 1999a). Concrètement, cela signifie que les conducteurs ne réalisent pas les actions de correction (décélération ou accélération) dès qu'ils détectent un changement de l'intervalle mais uniquement lorsque l'intervalle sort de la gamme des interdistances acceptables. De ce point de vue, il n'est pas certain que l'augmentation du seuil de discrimination du mouvement relatif due au brouillard se répercute sur le contrôle de l'intervalle.

Chapitre 6 : Discussion générale

Pour savoir si la réduction de la sensibilité au mouvement relatif amène les conducteurs à réduire leur intervalle, nous avons étudié une situation où les participants devaient contrôler leur intervalle par rapport au véhicule lièvre. Notre hypothèse était que les participants dont l'intervalle préférentiel ne permet pas de voir suffisamment la silhouette du véhicule lièvre en condition de brouillard, réduisent leur intervalle de façon à la voir correctement. Nous supposons par ailleurs que cette adaptation est bénéfique pour le contrôle de l'intervalle, dans le sens où elle permet de le contrôler plus précisément et plus facilement.

Conformément à notre hypothèse, les participants dont l'intervalle préférentiel ne permettait pas de voir suffisamment la silhouette du véhicule lièvre en condition de brouillard ont réduit leur intervalle de façon à la voir correctement. D'une façon plus générale, nous avons observé une convergence des intervalles pratiqués en condition de brouillard vers les interdistances permettant une bonne visibilité de la silhouette. Ce constat semble toutefois limité aux situations où l'exigence du contrôle de l'intervalle est importante, i.e. lorsque le véhicule lièvre avait une vitesse variable. Ce phénomène de convergence était en effet moins présent lorsque le contrôle de l'intervalle était facile, i.e. lorsque le véhicule lièvre avait une vitesse constante.

Par ailleurs, le brouillard n'a pas eu d'effet sur la précision du contrôle de l'intervalle, contrairement à ce que nous avons supposé, mais la charge mentale (mesurée à travers les mouvements de pédales) était plus élevée en condition de brouillard pour les intervalles ne permettant pas de voir correctement la silhouette du véhicule lièvre. Les participants semblent donc avoir compensé la réduction de la sensibilité au mouvement relatif due au brouillard par une augmentation de la charge mentale, permettant ainsi de maintenir la précision du contrôle de trajectoire au même niveau que par temps clair. En conséquence, la réduction de l'intervalle en condition de brouillard, de façon à voir correctement la silhouette du véhicule lièvre, permet d'améliorer la sensibilité au mouvement relatif et ainsi de réduire la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle.

Enfin, l'augmentation de la charge mentale et la réduction des intervalles en condition de brouillard est compatible avec l'augmentation du seuil de discrimination du mouvement relatif due au brouillard. Cette interprétation tend à valider le modèle de suivi de véhicule de Brackstone et McDonald (1999) et Brackstone, Sultan, et McDonald (2002), où le contrôle de l'intervalle est basé sur des seuils perceptifs. Une autre interprétation possible de nos résultats se base sur les résultats de Blakemore et Snowden (1999) qui montrent que la vitesse perçue

d'un mouvement d'expansion/contraction est plus lente lorsque le contraste de la cible est réduit. Selon cette interprétation, la vitesse perçue du mouvement relatif est réduite en condition de brouillard, et les effets observés sur la charge mentale et les intervalles adoptés sont la conséquence de cette distorsion perceptive. Une expérience perceptive portant sur l'appréciation de la vitesse relative en condition de brouillard permettrait d'évaluer la validité de ces deux interprétations, qui ne sont par ailleurs pas exclusives.

Dans la dernière expérimentation, nous nous sommes intéressé aux exigences liées au contrôle de la trajectoire et à leur influence sur le choix de l'intervalle.

5.4 Effet du contrôle de la trajectoire sur le choix de l'intervalle

Le contrôle de trajectoire a été largement étudié, et le modèle de double contrôle proposé par Donges (1978) est considéré comme une référence. D'après ce modèle, le contrôle de trajectoire repose d'une part sur un mode de régulation proactive utilisant des informations lointaines et nécessitant une attention intermittente, et d'autre part sur un mode de régulation rétroactive utilisant des informations proches (les bords de la chaussée) et nécessitant une attention permanente. En situation de conduite libre (i.e. sans véhicule lièvre) le masquage du tracé lointain par le brouillard empêche le fonctionnement du système de régulation proactive (Malaterre et al., 1991). Malaterre et al. (1991) font l'hypothèse qu'en fournissant les informations manquantes sur la trajectoire future, le suivi d'un véhicule permet de rétablir un fonctionnement anticipatoire. Par ailleurs, Mars (2006, 2007) a montré que le contrôle de trajectoire est plus précis lorsque le regard est porté vers une cible visuelle pouvant être un véhicule lièvre. L'utilisation du véhicule lièvre comme guide en condition de brouillard devrait donc améliorer le contrôle de la trajectoire. Ce bénéfice devrait néanmoins être limité aux intervalles courts puisque la mémorisation de la trajectoire est limitée à 1.5 s (Hildreth et al., 2000) et qu'un intervalle trop long conduirait à des erreurs de placement sur la chaussée (Malaterre et al., 1991). Nous faisons donc l'hypothèse que les informations fournies par le véhicule lièvre sont bénéfiques pour le contrôle de trajectoire mais uniquement lorsque l'intervalle est court, ce qui devrait amener les conducteurs à réduire leur intervalle en condition de brouillard.

Pour savoir si le contrôle de trajectoire affecte le choix de l'intervalle adopté en condition de brouillard, nous avons étudié une situation de suivi de véhicule sur route sinueuse, afin d'augmenter les exigences liées à la tâche de contrôle de trajectoire. Les résultats de notre

expérience invalident l'hypothèse d'un bénéfice apporté par le suivi de près d'un véhicule lièvre. Nous nous attendions à ce que le contrôle de la trajectoire soit plus facile ou plus précis pour des intervalles courts en condition de brouillard, mais ça n'a pas été le cas. La réduction des intervalles en condition de brouillard ne semble donc pas être expliquée par un bénéfice pour le contrôle de la trajectoire. En revanche, nous constatons que les participants utilisent le véhicule lièvre comme guide en condition de brouillard, comme en atteste l'effet de l'intervalle sur la trajectoire empruntée dans les virages en condition de brouillard. La question est donc de savoir pourquoi le véhicule lièvre est utilisé comme guide, si ce n'est pas pour faciliter ou améliorer le contrôle de trajectoire. Une explication possible est que le véhicule lièvre assure un guidage social, tel que l'avait suggéré Schönbach (1996, 1997). Selon cette hypothèse, les conducteurs tendent à se comparer au véhicule qui les précède et à l'utiliser comme référence (théorie de la comparaison sociale).

5.5 En résumé...

A la lumière de l'ensemble des résultats dont nous disposons aujourd'hui, il ressort que la surestimation des interdistances se limite aux conditions de brouillard extrêmement dense, et qu'elle ne peut donc pas expliquer la réduction des intervalles. D'autre part, du point de vue du contrôle de la trajectoire, nous n'avons montré aucun bénéfice perceptivo-moteur à suivre le véhicule lièvre de près en condition de brouillard. La réduction des intervalles en condition de brouillard ne peut donc pas être expliquée par un bénéfice pour le contrôle de trajectoire, contrairement à l'hypothèse de Malaterre et al. (1991). Nos résultats suggèrent que le véhicule lièvre est utilisé comme guide en condition de brouillard. Il pourrait alors s'agir d'un guidage social conformément à l'hypothèse de Schönbach (1996).

Il ressort enfin que la sensibilité au mouvement relatif est réduite en condition de brouillard lorsque la silhouette du véhicule lièvre n'est pas suffisamment visible, i.e. lorsque l'interdistance est grande. Cette sensibilité réduite en condition de brouillard peut amener les conducteurs à réduire leur intervalle de façon à voir correctement la silhouette du véhicule lièvre. En améliorant la sensibilité au mouvement relatif, cette stratégie permet (i) de réduire la charge mentale allouée au contrôle de l'intervalle et (ii) de garder en vue le véhicule lièvre plus facilement. L'adoption de cette stratégie par les conducteurs peut expliquer en partie la réduction des intervalles observée lors de l'expérience de suivi de véhicules et en situation réelle. Les données présentées par Bulté (1985) montrent en effet que les intervalles adoptés

en condition de brouillard dense sont ceux qui permettent une bonne visibilité de la silhouette du véhicule lièvre. Cette stratégie peut également expliquer la réduction des intervalles observée par Hawkins (1988), même si elle ne rend pas compte de l'adoption d'intervalles très courts par certains conducteurs dans la voie rapide.

6 Limites

Les travaux présentés dans cette thèse permettent de proposer une explication à la réduction des intervalles en condition de brouillard en termes d'une adaptation des conducteurs face à la réduction de la sensibilité au mouvement relatif causée par le brouillard. Néanmoins, les expérimentations ont été réalisées dans des conditions spécifiques qu'il convient de considérer pour déterminer la validité des interprétations formulées.

6.1 Les situations expérimentales étudiées

Les hypothèses étudiées portaient sur la perception du véhicule lièvre (interdistance et mouvement relatif) et sur les informations utiles au contrôle de la trajectoire qu'il peut apporter. Nous avons donc choisi lors de nos expérimentations de ne simuler que le véhicule lièvre. Puisque la conduite en peloton fait intervenir d'autres mécanismes que ceux impliqués dans le suivi d'un seul véhicule (Schönbach, 1996), nos travaux ne peuvent pas expliquer l'ensemble des phénomènes impliqués dans une situation de conduite en file.

Nous avons par ailleurs choisi d'étudier une tâche de suivi de véhicule assez difficile, i.e. avec des variations de vitesse du véhicule lièvre d'une amplitude assez importante. Ces variations importantes étaient nécessaires pour qu'il y ait interaction entre les deux véhicules, i.e. pour que les participants aient à réagir aux variations de vitesse du véhicule lièvre. De plus, l'absence de réduction de l'intervalle chez Hogema et van der Horst (1994b) est peut être liée à l'absence de variations de vitesse.

Mentionnons par ailleurs le brouillard très dense qui était utilisé pour nos expérimentations, correspondant aux brouillards pour lesquels les comportements les plus dangereux sont observés en situation réelle. La nécessité de garder le contact visuel avec le véhicule lièvre et plus particulièrement le besoin de voir sa silhouette pour contrôler facilement l'intervalle, ont imposé de suivre le véhicule lièvre de près. Ces contraintes liées à

la visibilité du véhicule lièvre sont moindres lorsque le brouillard est plus léger, et ne conduisent donc pas nécessairement à une réduction de l'intervalle (e.g. van der Hulst et al., 1998).

Enfin, les expériences ont été réalisées uniquement avec du brouillard diurne puisque le brouillard nocturne n'a pas été validé sur le simulateur de conduite (Cavallo et al., 2002). Une éventuelle transposition des conclusions issues de ces travaux aux conditions de brouillard nocturne doit se faire avec précaution. Considérons plus particulièrement l'augmentation du seuil de perception du mouvement relatif avec le brouillard lorsque la silhouette du véhicule lièvre n'est pas visible. En condition nocturne, la silhouette du véhicule lièvre n'est généralement pas visible, même en l'absence de brouillard. Le faible écartement entre les feux de brouillard ne devrait donc pas conduire à une augmentation du seuil perceptif en présence de brouillard. Par ailleurs, en condition nocturne il y a peu de flux optique environnemental. Le masquage de l'environnement par le brouillard ne devrait donc pas avoir un effet bénéfique sur la sensibilité au mouvement relatif comme c'est le cas en condition diurne. A partir de ces éléments, on peut émettre l'hypothèse que le brouillard a peu d'effet sur le seuil de perception du mouvement relatif en condition nocturne, excepté pour les interdistances très courtes où la silhouette du véhicule lièvre peut être éclairée par les feux du véhicule suiveur. Pourtant, les études de trafic et accidentologiques montrent une réduction des intervalles à la fois en condition diurne et en condition nocturne (Bulté, 1985 ; White & Jeffery, 1980) ainsi qu'un plus grand nombre d'accidents en condition nocturne (Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière, 2008). La réduction des intervalles en condition de brouillard pourrait donc avoir d'autres causes qu'une réduction de la sensibilité au mouvement relatif.

6.2 Simulateur de conduite

Les expériences présentées dans cette thèse ont toutes été réalisées sur simulateur de conduite, utilisant des tâches de jugements perceptifs ou des tâches de conduite. L'utilisation du simulateur présente de nombreux avantages mais pose également des problèmes de validité "écologique" à plusieurs niveaux. Mentionnons les problèmes de restitution sensorielle qui constituent un enjeu majeur pour le développement des simulateurs, et qui sont de ce fait largement étudiés (Kemeny & Panerai, 2003 ; Padmos & Milders, 1992 ; Pinto, Cavallo, Ohlmann, 2008). Il est par exemple possible que la résolution spatiale du système d'affichage ait retardé la détection du mouvement relatif. Cette éventualité, discutée en Annexe 5 (page

270), ne remet pas nos conclusions en cause puisqu'elle tendrait à masquer les effets qui sont apparus. La non-restitution des accélérations est également susceptible d'affecter le contrôle de l'intervalle et le contrôle de la trajectoire. On peut néanmoins s'attendre à ce que ces deux types de contrôles soient affectés à la fois en condition de visibilité normale et en condition de brouillard. Enfin, nombre d'auteurs se sont intéressés à l'effet de la qualité des images générées en environnement virtuel (Thompson et al., 2004) et du champ de vision (Creem-Regehr & al., 2005 ; Knapp & Loomis, 2004 ; Wu & al., 2004) sur la perception des distances. Même s'il apparaît une sous-estimation des distances lorsque le champ de vision est réduit dans le sens vertical, rien dans les résultats de ces travaux ne permet de penser que ce biais apparaîtrait différemment en condition de visibilité normale et en condition de brouillard.

7 Perspectives

Suite à ces travaux, nous proposons plusieurs voies pour de futures recherches. Les perspectives que nous proposons consistent d'abord en un prolongement des présents travaux mais également en l'étude d'autres variables perceptives. Nous proposons enfin d'élargir les investigations à d'autres approches.

7.1 Prolongement des présents travaux

A partir des données très riches dont nous disposons, nous envisageons de réaliser d'autres traitements susceptibles d'apporter des informations complémentaires.

Il nous paraît particulièrement intéressant de quantifier le temps mis par les participants pour réagir aux variations de vitesse du véhicule lièvre. Nous pourrions ainsi savoir (i) si les participants ont réagi plus tardivement lorsqu'il y avait du brouillard (comme le laisse supposer la sensibilité dégradée au mouvement relatif en condition de brouillard) et (ii) si les variations de vitesse pouvaient être anticipées dans certaines conditions. Ces traitements peuvent être réalisés en considérant les conducteurs et leur véhicule comme un "système" qui cherche à reproduire les variations de vitesse du véhicule lièvre et en calculant la fonction de transfert de ce "système", comme l'ont fait Andersen et Sauer (2007). La fonction de transfert indique le gain et le retard de phase du "système" en fonction de la fréquence des variations

de vitesse. Cette fonction de transfert nous renseigne alors sur la capacité des conducteurs à reproduire les variations de vitesse du véhicule lièvre.

Nous avons d'autre part mentionné la difficulté d'extrapoler les résultats concernant le seuil de perception du mouvement relatif, aux conditions de brouillard nocturnes. Il serait donc utile de mesurer ce seuil en condition de brouillard nocturne afin d'obtenir une compréhension plus globale de la perception du mouvement relatif et donc du contrôle de l'intervalle. Puisque le brouillard nocturne n'a pas été validé sur simulateur de conduite, la mesure de ce seuil pourrait se faire en salle de brouillard avec un équipement permettant de mouvoir le véhicule cible.

Enfin, l'expérience de suivi de véhicule a révélé l'influence des variations de vitesse du véhicule lièvre sur l'intervalle adopté par les participants. Il pourrait être intéressant d'approfondir ces résultats en reproduisant l'expérience de suivi de véhicule avec différents niveaux de variation de vitesse. De plus, en intégrant une condition de conduite libre à cette expérience, nous pourrions tester l'hypothèse de Malaterre et al. (1991). Selon ces auteurs, le suivi d'un véhicule lièvre en condition de brouillard pourrait permettre de rétablir un mode de régulation proactif pour le contrôle de trajectoire, alors que le contrôle directionnel semble se limiter à un mode rétroactif en condition de brouillard lorsqu'il n'y a pas de véhicule lièvre.

7.2 Etude d'autres variables perceptives

Malgré le grand nombre de modèles de suivi de véhicules existants (Brackstone & McDonald, 1999) les variables perceptives impliquées dans le contrôle de l'intervalle et leur rôle précis ne sont pas entièrement connus. La perception de plusieurs de ces variables a d'ores et déjà été étudiée en condition de brouillard. Ainsi la perception de la vitesse propre en condition de brouillard simulé a fait l'objet de plusieurs recherches (Cavallo & Pinto, 2001 ; Pretto & Chatziastros, 2006 ; Pretto et al., 2008), mais elles ne montrent pas de sous-estimations de la vitesse propre en condition de brouillard pouvant expliquer une réduction des intervalles.

D'autres variables perceptives sont susceptibles d'affecter l'intervalle adopté. Il s'agit notamment de la perception du mouvement relatif dans le sens d'une appréciation de sa vitesse. Hoffmann et Mortimer (1996) considèrent effectivement que pour réagir aux variations de vitesse du véhicule lièvre, il faut être en mesure d'apprécier la vitesse du

mouvement relatif afin d'avoir une réponse adaptée, i.e. de doser le freinage. Les travaux de Blakemore et Snowden (1999) laissent justement penser que la vitesse du mouvement relatif pourrait être sous-estimée en condition de brouillard. Cette réduction de la vitesse perçue pourrait alors affecter les intervalles adoptés par un mécanisme similaire à celui que nous avons décrit concernant la sensibilité au mouvement relatif, i.e. que les conducteurs pourraient se rapprocher du véhicule lièvre afin de rétablir une perception correcte du mouvement relatif. Une expérience perceptive portant sur l'appréciation de la vitesse relative en condition de brouillard permettrait de savoir si une mauvaise perception de la vitesse du mouvement relatif est également susceptible d'affecter le contrôle de l'intervalle en condition de brouillard, et donc de contribuer à expliquer les résultats observés lors de l'expérience de suivi de véhicule.

On peut d'ailleurs considérer le jugement du TTC (Time To Collision) comme une forme de quantification du mouvement relatif. Bien que Buchner et al. (2006) ont étudié la perception du TTC uniquement en condition de brouillard nocturne et sans comparaison avec la condition de visibilité normale, leurs résultats laissent penser que le TTC est surestimé en condition de brouillard. D'une façon générale, nous supposons qu'un jugement erroné du TTC affecte la dynamique de régulation de l'intervalle. Ainsi, d'après le modèle de van Winsum (1999), une surestimation du TTC devrait amener à une décélération plus tardive du véhicule suiveur lorsque l'intervalle entre deux véhicules se réduit. Une conséquence serait une augmentation du risque de collision en condition de brouillard. Nous nous retrouvons cependant face aux limites des modèles de suivi de véhicule, lorsqu'il s'agit d'évaluer les conséquences d'une surestimation du TTC sur l'intervalle adopté. Il est par exemple possible qu'en prenant conscience de leur erreur perceptive, les conducteurs adoptent par la suite des intervalles plus longs. Une autre possibilité est que les conducteurs se rapprochent du véhicule suivi afin de rétablir une meilleure perception. Pour trancher cette question, nous pourrions réaliser une expérimentation visant à étudier le jugement du TTC en condition de visibilité normale et en condition de brouillard diurne. Il serait ainsi possible de mettre les résultats obtenus en relation avec ceux de l'expérience de suivi de véhicule que nous avons présentée.

7.3 Des investigations élargies à d'autres approches

Nous avons cherché à comprendre les raisons d'une réduction des intervalles en condition de brouillard en nous intéressant à l'influence du brouillard sur les mécanismes perceptifs.

Néanmoins, la conduite est une activité complexe qui comprend plusieurs registres de régulation. Michon (1985) distingue le niveau opérationnel, le niveau tactique, et le niveau stratégique. Cette activité implique ainsi des tâches très diverses telles que le contrôle de la trajectoire, l'orientation, ou la communication avec les autres usagers de la route. Etant donné cette complexité, la réduction des intervalles en condition de brouillard peut avoir des explications se situant à différents niveaux de la tâche de conduite et relevant de différentes disciplines.

L'étude des intervalles adoptés en condition de brouillard à travers la psychologie sociale permettrait notamment d'étudier un aspect important qui n'a pas été pris en compte lors de nos expériences : l'altération de la communication sociale en condition de brouillard. Comme nous l'avons vu, Schönbach (1996) propose une explication selon laquelle la pression exercée par les feux du véhicule suiveur ainsi que l'utilisation du véhicule lièvre comme guide social amènent les conducteurs à réduire leurs intervalles. L'étude de cette hypothèse est d'autant plus pertinente que nous avons constaté l'utilisation du véhicule lièvre comme guide pour le contrôle de trajectoire, sans pour autant que nous ayons pu en montrer le bénéfice pour le contrôle de la trajectoire.

Par ailleurs, les données issues des expériences portant sur le seuil de perception du mouvement relatif ont été prises en compte dans un modèle de suivi de véhicule et ont ainsi donné lieu à des simulations concluantes (Boer et al., 2007, 2008). De la même façon, il est possible d'intégrer les données issues de l'expérience de suivi de véhicule à un tel modèle. Ces données sont plus justes que celles de l'expérience perceptive puisqu'elles sont directement issues du comportement de suivi de véhicule. Elles sont également plus complètes et peuvent rendre compte de la variabilité interindividuelle. Une application possible d'un modèle prenant ces données en compte, serait de simuler le comportement des véhicules composant un peloton. Nous pourrions ainsi savoir si le comportement observé de façon individuelle lors de l'expérience de suivi de véhicule conduit à des collisions lorsque plusieurs véhicules se suivent. L'absence de collisions dans un peloton (i.e. la stabilité asymptotique) est en effet plus difficile à obtenir que l'absence de collisions entre deux véhicules (Liger, 1986). L'auteur mentionne également que les collisions dans les pelotons sont favorisées lorsque les temps de réaction sont longs et que les réactions sont plus fortes. L'effet du brouillard sur la sensibilité au mouvement relatif pourrait donc remettre en cause la stabilité asymptotique.

7.4 Applications

Une première application serait de tenir compte de nos résultats dans le positionnement des feux de brouillard à l'arrière des véhicules lors de leur conception. Nous avons en effet vu que l'interdistance estimée est plus précise lorsque le véhicule lièvre comporte deux feux, soulignant l'intérêt d'équiper les véhicules de deux feux arrières de brouillard. D'autre part, une augmentation de l'écartement entre les deux feux permettrait non seulement de réduire l'interdistance perçue et ainsi de tendre à augmenter les intervalles par temps de brouillard (Cavallo et al., 2001), mais permettrait également de réagir plus tôt au rapprochement du véhicule suivi dans le cas où sa silhouette n'est pas visible.

Par ailleurs, notre étude de suivi de véhicule montre qu'en condition de brouillard dense, les participants convergent vers une interdistance permettant de voir correctement la silhouette du véhicule lièvre. Or, si les participants convergent vers une interdistance fixe (liée à la densité du brouillard), alors le TIV vers lequel ils convergent est d'autant plus court que la vitesse est élevée. Dès lors, toutes les mesures visant à réduire la vitesse des automobilistes par temps de brouillard devraient également être bénéfiques du point de vue des intervalles adoptés. Mentionnons par exemple les messages de prévention (Elliott, 1989), ou encore les limitations de vitesse pouvant être affichées sur les Panneaux à Messages Variables sur autoroute, en amont des zones de brouillard (Cooper & Sawyer, 1993).

Enfin, les effets du brouillard sur les mécanismes perceptifs et perceptivo-moteurs pourraient être expliqués lors de l'apprentissage de la conduite, tout en mettant l'accent sur les conséquences et les risques. Ce complément de formation pourrait inciter l'ensemble des conducteurs au respect des règles de sécurité par temps de brouillard.

Bibliographie

- Adams, W. J., & Mamassian, P. (2004). Bayesian combination of ambiguous shape cues. *Journal of Vision, 4*, 921-929.
- Adini, Y., Wilkowsky, A., Haspel, R., Tsodyks, M., & Sagi, D. (2004). Perceptual learning in contrast discrimination: The effect of contrast uncertainty. *Journal of Vision, 4*, 993-1005.
- Alais, D., & Burr, D. (2004). The ventriloquist effect results from near-optimal bimodal integration. *Current Biology, 14*, 257-262.
- Andersen, G. J., & Sauer, C. W. (2007). Optical information for car following: The driving by visual angle (DVA) model. *Human Factors, 49*, 878-896.
- Anstis, S. (2003). Moving objects appear to slow down at low contrasts. *Neural Networks, 16*, 933-938.
- Aron, M. (1988). Car following in an urban network: Simulation and experiments. In: *Proceedings of Seminar E at the 16th PTRC annual meeting*. Bath, UK, September 12-16.
- Aron, M., Biecheler, M.-B., & Peytavin, J.-F. (1996). *Interdistances, trafic et sécurité de la route* (Rapport de convention DSCR/INRETS No 95-41019). Arcueil, France: Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.
- Aron, M., Biecheler, M.-B., & Peytavin, J.-F. (1999). Temps intervéhiculaires et vitesses: Quels enjeux de sécurité ? *Recherche, Transports, Sécurité, 64*, 3-20.
- Banks, M. S. (2004). Neuroscience: What you see and hear is what you get. *Current Biology, 14*, R236-R238.
- Bar-Gera, H., & Shinar, D. (2005). The tendency of drivers to pass other vehicles. *Transportation Research Part F, 8*, 429-439.
- Beal, A. C., & Loomis, J. M. (1996). Visual control of steering without course information. *Perception, 25*, 481-494.
- Beaudoin, E. (2002). *La conduite sur simulateur dans le brouillard diurne: estimation des distances et régulation intervéhiculaire en situation dynamique* (Rapport de Stage de

Bibliographie

- DEA). Arcueil, France: Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité - Laboratoire de Psychologie de la Conduite.
- Bergot, T., Noilhan, J., & Bougeault P. (2002). Mécanismes du brouillard et programmes de recherche pour en améliorer la prévision. In: *Actes de la journée scientifique "Brouillard et visibilité routière"*. Paris, France: 19 novembre.
- Berthelon, C., & Mestre, D. (1993). Curvilinear approach to an intersection and visual detection of a collision. *Human Factors*, 35, 521-534.
- Blakemore, M. R., & Snowden, R. J. (1999). The effect of contrast upon perceived speed: a general phenomenon? *Perception*, 28, 33-48.
- Boer, E. R. (1999a). Car following from the driver's perspective. *Transportation Research Part F*, 2, 201-206.
- Boer, E. R. (1999b). A statistical model of looming detection. In A. G. Gale (Eds.), *Vision in vehicles VII* (pp. 319-327). Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V. (North Holland).
- Boer, E. R., Caro, S., Cavallo, V. (2007). A cybernetic perspective on car following in fog. In: *Proceedings of the fourth international driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design*. Stevenson, WA, July 9-12.
- Boer, E. R., Caro, S., & Cavallo, V. (2008). A perceptually grounded driver model for car following in fog. In: *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe*. Monaco, January 31 - February 1st.
- Boer, E. R., Rakauskas, M. E., Ward, N. J., & Goodrich, M. A. (2005a). Steering entropy revisited. In: *Proceedings of the third international driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design*. Rockport, ME, June 27-30.
- Boer, E. R., & Ward, N. J. (2003). Event-based driver performance assessment. In: *Proceedings of the second international driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design*. Park City, UT, July 21-24.
- Boer, E. R., Ward, N. J., Manser, M. P., Kuge, N. (2005b). *Driver-model-based assessment of behavioral adaptation*. Paper presented at JSAE Automotive Engineering Exposition. Yokohama City, Japan, May 18-20.

Bibliographie

- Boer, E. R., Ward, N. J., Manser, M. P., Yamamura, T., Kuge, N. (2005c). Driver performance assessment with a car following model. In: *Proceedings of the third international driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design*. Rockport, ME, June 27-30.
- Bonnet, C. (1975). A tentative model for visual motion detection. *Psychologia*, 18, 35-50.
- Bonnet, C. (1984). Discrimination of velocities and mechanisms of motion perception. *Perception*, 13, 275-282.
- Bonnet, C. (1986). *Manuel pratique de psychophysique*. Armand Colin (Eds.), Paris, France.
- Bourrel, E., & Henn, V. (2002). Mixing micro and macro representations of traffic flow: A first theoretical step. In: *Proceedings of the 9th meeting of the Euro Working Group on Transportation*. Bari, Italy, June 10-13.
- Brackstone, M., & McDonald, M. (1999). Car following: A historical review. *Transportation Research Part F*, 2, 181-196.
- Brackstone, M., Sultan, B., & McDonald, M. (2002). Motorway driver behaviour: studies on car followong. *Transportation Research Part F*, 5, 31-46.
- Brookhuis, K. A., De Waard, D. (2002). Commentary on the assessment of (mental) workload and other subjective qualifications. *Ergonomics*, 45, 1026-1030.
- Broughton, K. L. M., Switzer, F., & Scott, D. (2007). Car following decisions under three visibility conditions and two speeds tested with a driving simulator. *Accident Analysis and Prevention*, 39, 106-116.
- Brown, I. (1970). Motorway Crashes in fog - Who's to blame? *New Scientist*, December 24, 544-545.
- Buchner, A., Brandt, M., Bell, R., & Weise, J. (2006). Car backlight position and fog density bias observer-car distance estimates and time-to-collision judgments. *Human Factors*, 48, 300-317.
- Bulté, B. (1985). *Brouillard. Comportement par visibilité réduite* (Tech. Rep.). Lille, France: Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement Nord Picardie.
- Burr, D. C., & Corsale, B. (2001). Dependency of reaction times to motion onset on luminance and chromatic contrast. *Vision Research*, 41, 1039-1048.

Bibliographie

- Burr, D. C., Fiorentini, A., & Morrone, C. (1998). Reaction time to motion onset of luminance and chromatic gratings is determined by perceived speed. *Vision Research*, 38, 3681-3690.
- Caro, S., Cavallo, V., Marendaz, C., Boer, E. & Vienne, F. (2007a). The influence of fog on motion discrimination thresholds in car following. In: *Proceedings of the fourth international driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design*. Stevenson, WA, July 9-12.
- Caro, S., Cavallo, V., Marendaz, C., Boer, E. & Vienne, F. (2007b). *Influence du brouillard sur les seuils de discrimination du mouvement en situation de suivi de véhicules*. Paper presented at Congrès national de la Société Française de Psychologie. Nantes, France, September 13-15.
- Carré, J. R., Lassarre, S., Liger, M. (1985). Fluidité – sécurité: Faut-il choisir? (2^{ème} partie). *Transports Environnement Circulation*, 69, 8-15.
- Castro, C., Martinez, C., Tornay, F. J., Fernandez, P. G., & Martos, F. J. (2005). Vehicle distance estimations in nighttime driving: a real-setting study. *Transportation Research Part F*, 8, 31-45.
- Cavallo, V., Caro, S., Doré, J., Colomb, M., & Dumont, E. (2007). Risky driving in fog: psychological explanations. In: *Proceedings of the 14th International Conference Road Safety on Four Continents*. Bangkok, Thailand, November 14-16.
- Cavallo, V., Colomb, M., & Doré, J. (2000). La surestimation de la distance intervéhiculaire dans le brouillard. *Recherche Transports Sécurité*, 66, 81-99.
- Cavallo, V., Colomb, M., & Doré, J. (2001). Distance perception of vehicles rear lights in fog. *Human Factors*, 43, 442-451.
- Cavallo, V., Doré, J., & Colomb, M. (1999). *Simulation de la conduite automobile: Etude de problèmes perceptifs de la conduite dans le brouillard* (Tech. Rep. No. 96 MT 24). Arcueil, France: Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité - Laboratoire de Psychologie de la Conduite.
- Cavallo, V., Dumont, E., & Gallée, G. (2002). Experimental validation of extended fog simulation techniques. In: *Proceedings of the Driving Simulation Conference 2002*. Paris, France, September.

Bibliographie

- Cavallo, V., & Pinto, M. (2001). *Does speed perception indeed fog up as visibility drops?* Paper presented at the International Conference on Vision in Vehicles IX, Boston, USA, August.
- Chandler, R. E., Herman, R., & Montroll, E. W. (1958). Traffic dynamics: studies in car following. *Operations Research*, 6, 165-184.
- Chatziastros, A., Wallis, G. M., & Bühlhoff, H. H. (1999). The effect of field of view and surface texture on driver steering performance. In A. G. Gale et al. (Eds.), *Vision in Vehicles VII* (pp. 253-259). Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V. (North Holland).
- Colbourn, C.J., Brown, I.D., & Copeman, A.K. (1978). Drivers' judgments of safe following distances in vehicle following. *Human Factors*, 20, 1-11.
- Cooper, B. R., & Sawyer, H. E. (1993). *Assessment of M25 automatic fog-warning system – Final report* (TRL Report 16, H5/30D). Crowthorne, UK: Transport Research Laboratory.
- Corless, R. M., Gonnet, G. H., Hare, D. E. G., Jeffrey, D. J., Knuth, D. E. (1996). On the Lambert W function. *Advances in Computational Mathematics*, 5, 329-359.
- Creem-Regehr, S. H., Willemsen, P., Gooch, A. A., & Thompson, W. B. (2005). The influence of restricted viewing conditions on egocentric distance perception: Implications for real and virtual indoor environments. *Perception*, 34, 191-204.
- Cumming, B. (1994). Motion in depth. In A.T. Smith & R.J. Snowden (Eds.), *Visual detection of motion* (pp. 333-366). London, UK: Academic Press Limited.
- Cutting, J. E., & Vishton, P. M. (1995). Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In W. Epstein & S. Rogers (Eds.), *Handbook of perception and cognition: Vol. 5. Perception of space and motion* (pp. 69-117). San Diego, CA: Academic Press.
- Da Silva, J. A. (1985). Scales for perceived egocentric distance in a large open field: Comparison of three psychophysical methods. *American Journal of Psychology*, 98, 119-144.
- De Lucia, P. R. (1991). Pictorial depth cues and motion-based information for depth perception. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 17, 738-748.

Bibliographie

- De Lucia, P. R. (2004). Multiple sources of information influence time-to-contact judgments: Do heuristics accommodate limits in sensory and cognitive processes? In H. Hecht & G.J.P. Savelsburgh (Eds.), *Advances in psychology: Vol. 135. Time-to-Contact* (pp. 243-286). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier-North-Holland.
- Deborne, R., Barthou, A., Toffin, D., Reymond, G., & Kemeny, A. (2008). Simulation study of driver stress and performance to an unexpected steering critical event. In: *Proceedings of the Driving Simulation Conference*. Monaco, January 31 – February 1st.
- Debus, G., Heller, D., Wille, M., Dütschke, E., Normann, M., & Placke, L. (2005). *Risikoanalyse von Massenunfällen bei Nebel* [Risk analysis for multiple car collisions in fog] (Bast report 82.108/1997). Bergisch-Gladbach, Germany: Bundesanstalt für Strassenwesen.
- Delorme, A. (1982). *Psychologie de la perception*. Montreal, CA: Editions Etudes Vivantes.
- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behavior. *Human Factors*, 20, 691-707.
- Duckstein, L., Unwin, E. A., & Boyd, E. T. (1970). Variable perception time in car following and its effect on model stability. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, 11, 149-156.
- Dumont, E. (2002). *Caractérisation, modélisation et simulation des effets visuels du brouillard pour l'utilisateur de la route* (Thèse de doctorat). Paris, France: Université René Descartes.
- Dumont, E. & Cavallo, V. (2004). Extended photometric model of fog effects on road vision. *Transportation Research Board*, 1862, 77-81.
- Dumont, E., Paulmier, G., Carta, V., Rozé, C., & Girasole, T. (2002). Codes de simulation de la diffusion multiple de la lumière dans le brouillard. In: *Actes de la journée scientifique "Brouillard et visibilité routière"*. Paris, France: 19 novembre.
- Edwards, M., Badcock, D. R., & Nishida, S. (1996). Contrast sensitivity of the motion system. *Vision Research*, 36, 2411-2421.
- Elliott, B. (1989). *Effective road safety campaigns: A practical handbook* (Report CR80). Sydney, AU: South Australian Department of Transport.

Bibliographie

- Emgström, J., Johansson, E., & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F*, 8, 97-120.
- Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415, 429-433.
- European Road Safety Observatory (2007). *Annual statistical report – Based on data from CARE/EC* (Report SafetyNet, Workpackage 1.3). European Commission.
- Evans, L., & Rothery, R. (1974). Detection of the sign of relative motion when following a vehicle. *Human Factors*, 16, 161-173.
- Evans, L., & Rothery, R. (1976). The influence of forward vision and target size on apparent inter-vehicular spacing. *Transportation Science*, 10, 85-101.
- Evans, L. & Rothery, R. (1977). Perceptual thresholds in car-following – A comparison of recent measurements with earlier results. *Transportation Science*, 11, 60-71.
- Fajen, B. R., & Warren, W. H. (2003). Behavioral dynamics of steering, obstacle avoidance, and route selection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 343-362.
- Fajen, B. R., Warren, W. H., Temizer, S., & Kaelbling, L. P. (2003). A dynamical model of visually-guided steering, obstacle avoidance, and route selection. *International Journal of Computer Vision*, 54, 13-34.
- Felipe, E., & Navin, F. (1998). Automobiles on horizontal curves: experiments and observations. *Transportation Research Record*, 1628, 50-56.
- Fitzpatrick, V., Pasnak, R., & Tyer, Z. E. (1982). The effect of familiar size at familiar distances. *Perception*, 11, 85-91.
- Flannagan, M. J., Sivak, M., & Simpson, J. K. (2001). The relative importance of pictorial and nonpictorial distance cues for driver vision. In: *Proceedings of the first international driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design*. Aspen, CO, August 14-17.
- Fournela, F. (2002). Mesure de la fonction de transfert optique d'un brouillard. In: *Actes de la journée scientifique "Brouillard et visibilité routière"*. Paris, France: 19 novembre.

Bibliographie

- Gerred Marble, J., & Proctor, R. W. (2000). Mixing location-relevant and location-irrelevant choice-reaction tasks: Influences of location mapping on the Simon effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 1515-1533.
- Gibson, J. J. (1958). Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *British Journal of Psychology*, 49, 182-194.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston, MA: Houghton Mifflin.
- Gipps, P. G. (1981). Abehavioural car following model for computer simulation. *Transportation Research Part B*, 15, 105-111.
- Godfroy, M., Roumes, C., & Dauchy, P. (2003). Spatial variations of visual-auditory fusion areas. *Perception*, 32, 1233-1245.
- Godthelp, H., Milgram, P., & Blaauw, G. J. (1984). The development of a time-related measure to describe driving strategy. *Human Factors*, 26, 257-268.
- Gogel, W. C., & Da Silva, J. A. (1987). Familiar size and the theory of off-sized perceptions. *Perception & Psychophysics*, 41, 318-328.
- Gogel, W. C., & Tietz, J. D. (1973). Absolute motion parallax and the specific distance tendency. *Perception & Psychophysics*, 13, 284-292.
- Goodale, M. A. & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *TINS*, 15 (1), 20-25.
- Gray, R., Macuga, K., Regan, D. (2004). Long range interactions between object-motion and self-motion in the perception of movement in depth. *Vision Research*, 44, 179-195.
- Gray, R., & Regan, D. (1996). Cyclopean motion perception produced by oscillations of size, disparity and location. *Vision Research*, 36, 655-665.
- Gray, R., & Regan, D. (2000). Simulated self-motion alters perceived time to collision. *Current Biology*, 10, 587-590.
- Grosjean, M., & Mordkoff, T. (2001). Temporal stimulus-Response compatibility. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 870-878.
- Haffenden, A. M., Schiff, K. C., & Goodale, M. A. (2001). The dissociation between perception and action in the Ebbinghaus illusion: Nonillusory effects of pictorial cues on grasp. *Current Biology*, 11, 177-181.

Bibliographie

- Hancock, P. A. (1999). Is car following the real question – are equations the answer? *Transportation Research Part F, 2*, 197-199.
- Harms, L. (1993). The influence of sight distance on subjects' lateral control: a study of simulated driving in fog. In A.G. Gale et al. (Eds.), *Vision in Vehicles IV* (pp. 109-116). Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V. (North Holland).
- Harris, A. J. (1964). Following distances, braking capacity, and the probability of danger of collision between vehicles. In: *Proceedings of Australian Road Research Board*, Vol. 2, pp. 496-512.
- Harte, D. B. (1975). Estimates of the length of highway guidelines and spaces. *Human Factors, 17*, 455-460.
- Harvey, L. O., & Michon, J. A. (1971). *The perception of manoeuvres of moving vehicles. Progress Report I – Effects of viewing distance and angular separation*. (TNO report 1971 C-6). Soesterberg, The Netherlands: TNO Institute for Perception.
- Harvey, L. O., & Michon, J. A. (1974). Detectability of relative motion as a function of exposure duration angular separation and background. *Journal of Experimental Psychology, 103*, 317-325.
- Hautière, N. (2005). *Détection des conditions de visibilité et estimation de la distance de visibilité par vision embarquée* (Thèse de doctorat). Saint-Etienne, France: Université Jean Monnet.
- Hawkins R. K. (1988). *Motorway traffic behaviour in reduced visibility conditions*. In: A. G. Gale (Eds), *Vision in vehicles II*. Nottingham, England, 1987.
- He, Z. J., Wu, B., Ooi, T. L., & Wu, J. (2004). Judging egocentric distance on the ground: Occlusion and surface integration. *Perception, 33*, 789-806.
- Heyes, M. P., & Ashworth, R. (1972). Further research on car following models. *Transportation Research, 6*, 287-291.
- Henn, V. (1995). *Utilisation de la logique floue pour la modélisation microscopique du trafic routier*. Paper presented at LFA'95 Rencontres francophones sur la logique floue et ses applications. Paris, France, November 27-28.
- Henn, V. (1997). Modèle de poursuite utilisant les techniques de la logique floue. *Recherche Transport Sécurité, 54*, 15-25.

Bibliographie

- Herman, R., Montroll, E. W., Potts, R. B., & Rothery, R. W. (1959). Traffic dynamics: analysis of stability in car following. *Operations Research*, 7, 86-106.
- Hildreth, E. C., Beusmans, J. M. H., Boer, E. R., & Royden, C. S. (2000). From vision to action: Experiments and models of steering control during driving. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 1106-1132.
- Hills, B. L. (1980). Vision, visibility, and perception in driving. *Perception*, 9, 183-216.
- Hoffmann, E. R., & Mortimer, R. G. (1996). Scaling of relative velocity between vehicles. *Accident Analysis and Prevention*, 28 (4), 415-421.
- Hogema, J. H., van der Horst, A. R. A. (1994a). *Driving Behaviour in fog: Analysis of inductive loop data* (TNO report TM 1994 C-6). Soesterberg, The Netherlands: TNO Human Factors Research Institute.
- Hogema, J. H., van der Horst, A. R. A. (1994b). *Driving behaviour in fog: A simulator study* (TNO report TM 1994 C-7). Soesterberg, The Netherlands: TNO Human Factors Research Institute.
- Hoppe, D. A., & Lauer, A. R. (1951). Factors affecting the perception of relative motion and distance between vehicles at night. *Highway Research Board*, 34, 1-16.
- Jacobs, R. A. (1999). Optimal integration of texture and motion cues to depth. *Vision Research*, 39, 3621-3629.
- Jacobs, R. A. (2002). What determines visual cue reliability? *Trends in Cognitive Sciences*, 6, 345-350.
- Jamson, A. H., & Merat, N. (2005). Surrogate in-vehicle information systems and driver behaviour: Effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. *Transportation Research Part F*, 8 (2), 79-96.
- Janssen, W. H. (1973). *The perception of manoeuvres of moving vehicles. Progress Report V - Thresholds for relative vehicle motion in depth: A check in the field.* (TNO report IZF 1973 C-12). Soesterberg, The Netherlands: TNO Institute for Perception.
- Janssen, W. H., Michon, J. A., & Harvey, L. O. (1976). The perception of lead vehicle movement in darkness. *Accident Analysis and Prevention*, 8, 151-166.

Bibliographie

- Kang, J. J., Ni, R., & Andersen, G. J. (2008). The effects of reduced visibility from fog on car following performance. In: *Proceedings of the 87th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington, DC, January 13-17.
- Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 31-37.
- Kerstein, D., Mamassian, P., & Yuille, A. (2004). Object perception as bayesian inference. *Annual Review of Psychology*, 55, 271-304.
- Knapp, J.M., & Loomis, J.M. (2004). Limited field of view of head-mounted displays is not the caus of distance underestimation in virtual environments. *Presence*, 13, 572-577.
- Knill, D. C. (2005). Reaching for visual cues to depth: The brain combines depth cues differently for motor control and perception. *Journal of Vision*, 5, 103-115.
- Kohly, R. P., & Regan, D. (1999). Evidence for a mechanism sensitive to the speed of cyclopean form. *Vision Research*, 39, 1011-1024.
- Kuje, N., Yamamura, T., Boer, E. R., Ward, N. J., & Manser M. P. (2006). Study on driver's car following abilities based on an active haptic support function. In: *Proceedings of the SAE World Congress*. Detroit, MI, April 2-6.
- Lamble, D., Kauranen, T., Laakso, M., & Summala, H. (1999). Cognitive load and detection thresholds in car following situations: safety implications for using mobile (cellular) telephones while driving. *Accident Analysis and Prevention*, 31, 617-623.
- Land, M. F. (1998). The visual control of steering. In Harris L.R. & Jenkin M. (Eds.), *Vision and Action* (pp. 163-180). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Land, M. F., & Horwood, J. (1995). Which parts of the road guide steering? *Nature*, 377, 339-340.
- Land, M. F., & Lee, D. N. (1994). Where wee look when we steer. *Nature*, 369, 742-744.
- Landy, M. S., Maloney, L. T., Johnston, E. B., & Young, M. (1995). Measurement and modeling of depth cue combination: In defence of weak fusion. *Vision research*, 35, 389-412.
- Lappe, M., Grigo, A., Bremmer, F., Frenz, H., Bertin, R. J. V., & Israël, I. (2000). Perception of heading and driving distance from optic flow. In: *Proceedings of the Driving Simulation Conference 2000*. Paris, France, September.

Bibliographie

- Leclercq, L. (2007). Hybrid approaches to the solutions of the "Lighthill-Whitham-Richards" model. *Transportation Research Part B*, 41, 701-709.
- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5, 437-459.
- Leibowitz, H. W. (1955). The relation between the rate threshold for the perception of movement and luminance for various durations of exposure. *Journal of Experimental Psychology*, 49, 209-214.
- Liger, M. (1986). *Intervalles et collisions arrières: Une synthèse et des propositions* (Rapport CETE Méditerranée). Aix-en-Provence, France: Centre d'Etudes Techniques du Ministère de l'Équipement.
- Loomis, J. M., & Knapp, J. M. (2003). Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. In: L.J. Hettinger and M.W. Haas (Eds.), *Virtual and adaptive environments* (pp. 21-46). Mahwah, NJ.
- MacDonald, W. A., & Hoffmann, E. R. (1980). Review of relationships between steering wheel reversal rate and driving task demand. *Human Factors*, 22, 733-739.
- Malaterre, G. (1991). *Les accidents en file sur autoroute: Évaluation a priori de l'impact que pourrait avoir sur la sécurité un meilleur respect des inter-distances* (Rapport de convention INRETS-ISIS, Phase 1). Arcueil, France: Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité – Laboratoire de Psychologie de la Conduite.
- Malaterre, G. (1994). *Méthode de mesure de la charge de travail en situation de conduite simulée et réelle* (Rapport INRETS No. 191). Arcueil, France: Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité - Laboratoire de Psychologie de la Conduite.
- Malaterre, G. (1995). Comparisons between simulation and actual driving situations: some experiments. In: *Proceedings of the Driving Simulation Conference 1995* (pp. 59-76). Toulouse, France.
- Malaterre, G., Cavallo, V., Gauriat, P., Lenoir, F., Martinez, S., & Perrot, C. (1992). *Évaluation de la charge de travail du conducteur au cours d'une tâche de conduite simulée* (Rapport de convention DSCR-INRETS, étude n° 14). Arcueil, France: Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité - Laboratoire de Psychologie de la Conduite.

Bibliographie

- Malaterre G., Hary A., & Quéré F. (1991). Analyse spectrale des mouvements de volant par temps de brouillard sur simulateur de conduite. *Recherche Transport Sécurité*, 30, 52-56.
- Mars, F. (2006). *Driving in curves with constrained gaze orientation in the vicinity of the tangent point*. Paper presented at the International Conference on Vision in Vehicles XI, Dublin, Ireland, July 27-29.
- Mars, F. (2007). *Visual cue enhancement can improve the control of steering*. Paper presented at the 16th Virtual Images Seminar, Paris, France, January 11.
- Matsuki, Y., Shidoji, K., & Matsunaga, K. (2001). Reaction time while driving with an insufficient headway. In A. G. Gale (Eds.), *Vision in vehicles VIII*. Boston, USA, August, 1999.
- McCloskey, M., Rapp, B., Yantis, S., Rubin, G., Bacon, W., Dagnelie, G., Gordon, B., Alimososa, D., Boatman, D., Badecker, W., Johnson, D., Tusa, R., Palmer, E. (1995). A developmental deficit in localizing objects from vision. *Psychological Science*, 6, 112-117.
- McLean, J. R., & Hoffmann, E. R. (1973). The effect of restricted preview on driver steering control and performance. *Human Factors*, 15, 421-430.
- McLean, J. R., & Hoffmann, E. R. (1975). Steering reversals as a measure of driver performance and steering task difficulty. *Human Factors*, 17, 248-256.
- Mestre, D. R. (2001). Dynamic evaluation of the useful field of view in driving. In: *Proceedings of the first international driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design*. Aspen, CO, August 14-17.
- Mestre, D. R., Mars, F., Durand, S., Vienne, F., & Espié, S. (2005). Gaze behavior during simulated driving: Elements for a visual driving aid. In: *Proceedings of the third international driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design*. Rockport, ME, June 27-30.
- Michaels, R.M. (1963). Perceptual factors in car following. In: *Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road Traffic*. Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris, France, 44-59.

Bibliographie

- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do? In L. Evans & R.C. Schwing (Eds.), *Human behavior and traffic safety* (pp. 485-520). New York, NY: Plenum Press.
- Miller, J. O., & Low, K. (2001). Motor processes in simple, Go/no-go, and choice reaction time tasks: A psychophysiological analysis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 266-289.
- Mortimer, R. G. (1971). The value of an accelerator release signal. *Human Factors*, 13, 481-486.
- Neboit, M. (1974). Perception, anticipation et conduite automobile. *Le Travail Humain*, 37, 53-72.
- O'Shea, R. P., Blackburn, S. G., & Ono, H. (1994). Contrast as a Depth Cue. *Vision Research*, 34, 1595-1604.
- Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière (2007). *La sécurité routière en France: Bilan de l'année 2006* (ISBN : 978-2-11-0066828-6). Paris, France: Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière.
- Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière (2008). *Brouillard – Grands thèmes de la sécurité routière en France* (Rapport). Paris, France: Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière.
- Ohta, H. (1996). Distance perception in driving. In: *Proceedings of international conference on traffic and transport psychology*. Valencia, SP, May 22-25.
- Ooi, T. L., Wu, B., & He, Z. J. (2001). Distance determined by the angular declination below the horizon. *Nature*, 414, 197-200.
- Padmos, P., Milders, M. V. (1992). Quality criteria for simulator images: A literature review. *Human Factors*, 34, 727-748.
- Pagano, C. C., Grutzmacher, R. P., & Jenkins, J. C. (2001). Comparing verbal and reaching responses to visually perceived egocentric distances. *Ecological Psychology*, 13, 197-226.
- Paulmier, G. (2004). Fog Luminance Evaluation in Daytime. *Transportation Research Record*, 1862, 82-88.

Bibliographie

- Pinto, M., Cavallo, V., Ohlmann, T. (2008). The development of driving simulators: Toward a multisensory solution. *Le Travail Humain*, 71, 62-95.
- Portfors-Yeomans, C. V., & Regan, D. (1996). Cyclopean discrimination thresholds for the direction and speed of motion in depth. *Vision Research*, 36, 3265-3279.
- Pretto, P., Vidal, M., & Chatziastros A. (2008). Why fog increases the perceived speed. In: *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe*. Monaco, January 31 - February 1st.
- Probst, T. (1986). Thresholds for detection of changes in headway are elevated during car ride. In A. G. Gale (Eds), *Vision in vehicles I* (pp. 157-166). Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V. (North Holland).
- Probst, T., Krafczyk, S., & Brandt, T. (1987). Object-motion detection affected by concurrent self-motion perception: Applied aspects for vehicle guidance. *Ophthal Physiology Optics*, 7, 309-314.
- Probst, T., Krafczyk, S., Brandt, T., & Wist, E. R. (1984). Interaction between perceived self-motion and object-motion impairs vehicle guidance. *Science*, 225, 536-538.
- Ranney, T. A. (1999). Psychological factors that influence car-following and car-following model development. *Transportation Research Part F*, 2, 213-219.
- Reinhardt-Rutland, A. H. (1986). Misleading perception and vehicle guidance under poor conditions of visibility. In A. G. Gale (Eds), *Vision in vehicles I* (pp. 413-416). Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V. (North Holland).
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., & Berthoz, A. (2001). Role of lateral acceleration in curve driving: Driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator. *Human Factors*, 43, 483-495.
- Regan, D., & Beverly, K. I. (1978). Looming detectors in the human visual pathway. *Vision Research*, 18, 415-421.
- Regan, D. M., Kaufman, L., & Lincoln, J. (1986). Motion in depth and visual acceleration. In: K.R. Boff, L. Kaufman & J.P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance, Volume 1: Sensory processes and perception* (pp. 19-1, 19-44). New York, NY: John Wiley and Sons.

Bibliographie

- Reinhardt-Rutland, A. H. (1992). On learning, distance overestimation and mist-related motorway casualties. *Perceptual and Motor Skills*, 74, 130.
- Rogers, B., & Graham, M. (1979). Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, 8, 125-134.
- Rohaly, A. M., & Wilson, H. R. (1999). The effects of contrast on perceived depth and depth discrimination. *Vision Research*, 39, 9-18.
- Rosey, F., & Espie, S. (2007). *Influence of fog on driver behaviour using driver simulator* (Délivrable 4.2 du projet européen INTRO, pp. 75-84). Paris, France: Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.
- Ross, H. E. (1975). Mist, murk and visual perception. *New Scientist*, June 19, 658-660.
- Roumes, C., Meehan, J. W., Plantier, J., & Menu, J.-P. (2001). Distance estimation in a 3-D imaging display. *The International Journal of Aviation Psychology*, 11, 381-396.
- Saad, F. (1996a). *Critical car-following when driving on an urban motorway: analyses of the situational demands and driver's activity in real driving conditions*. Paper presented at Roadsafe international conference, Influences affecting road behaviour. London, UK, July 24-25.
- Saad, F. (1996b). Driver strategies in car-following situations. In A. G. Gale (Eds.), *Vision in vehicles V*. Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V. (North Holland).
- Salvucci, D. D., & Gray, R. (2004). A two-point visual control model of steering. *Perception*, 33, 1233-1248.
- Santos, J.A. (1997). Vehicle-motion detection: Inhibitory effects of self-motion and optical flow structure. In A. G. Gale (Eds.), *Vision in vehicles VI* (pp. 289-295). Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V. (North Holland).
- Santos, J. A., Berthelon, C., & Mestre, D. R. (2002). Perception of road users' motion. In: R. Fuller and J. A. Santos (Eds.), *Human factors for highway engineers* (pp. 115-130). Oxford, UK: Pergamon Press.
- Santos, J., Noriega, P., & Albuquerque, P. (1997). Perceptual cues in vehicle's motion detection. In: *Proceedings of the 13th Triennial Congress of the International Ergonomics Association*. Tampere, Finland, 439-441.

Bibliographie

- Santos, J., Noriega, P., & Albuquerque, P. (1999). Vehicle's motion detection: Influence of road layout and relation with visual driver's assessment. In A. G. Gale, I. D. Brown, C. M. Haslegrave & S. P. Taylor (Eds.), *Vision in Vehicles VII* (pp. 337-355). Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V. (North Holland).
- Santos, J., Noriega, P., Correia, M., Campilho, A. & Albuquerque, P. (2000). *Object motion segmentation and optical flow contrast* (Report: Relatórios de Investigação C.E.E.P.). Braga, Portugal: Universidade do Minho.
- Sauer, C. W., Andersen, G. J., & Saidpour, A. (2004). *Detection and avoidance of collisions: The REACT model* (California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2004-7). Berkeley, CA: Institute of Transportation Studies.
- Schenk, T., Schindler, I., McIntosh, R. D., & Milner, A. D. (2005). The use of visual feedback is independent of visual awareness: evidence from visual extinction. *Experimental Brain Research*, 167, 95-102.
- Schiff, W. (1980). *Perception: An applied approach*. Boston, MA: Houghton Mifflin.
- Schönbach, P. (1996). Massenunfälle bei Nebel [Collisions multiples par temps de brouillard]. *Zeitschrift für Sozialpsychologie*, 109-125.
- Schönbach, P. (1997). *Approche socio-psychologique dans la conduite par temps de brouillard*. Paper presented at "La Conduite en Condition de Visibilité Réduite" conference. Clermont-Ferrand, France, June 3-4.
- Seiffert, A. E., & Cavanagh, P. (1998). Position displacement, not velocity, is the cue to motion detection of second-order stimuli. *Vision Research*, 38, 3569-3582.
- Seiffert, A. E., & Cavanagh, P. (1999). Position-based motion perception for color and texture stimuli: effects of contrast and speed. *Vision Research*, 39, 4172-4185.
- Sinai, M. J., Ooi, T. L., & He, Z. J. (1998). Terrain influences the accurate judgement of distance. *Nature*, 395, 497-500.
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: Is it indeed 90% visual? *Perception*, 25, 1081-1089.
- Smeets, J. B. J., Brenner, E., Trébuchet, S., & Mestre, D. R. (1996). Is judging time-to-contact based on 'tau'? *Perception*, 25, 583-590.

Bibliographie

- 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.
- Sumnall, J. H., & Harris, J. M. (2002). Minimum displacement thresholds for binocular three-dimensional motion. *Vision Research*, *42*, 715-724.
- Taieb-Maimon, M., & Shinar, D. (2001). Minimum and comfortable driving headways: reality versus perception. *Human Factors*, *43* (1), 159-172.
- Teghtsoonian, M., & Teghtsoonian R. (1969). Scaling apparent distance in natural indoor setting. *Psychonomic Science*, *16*, 281-283.
- Teghtsoonian, R., & Teghtsoonian M. (1970). Scaling apparent distance in natural outdoor setting. *Psychonomic Science*, *21*, 215-216.
- Tenkink, E. (1987). *Lane keeping and speed choice with restricted sight distances*. Paper presented at the 2nd International Conference on Road Safety, Groningen, The Netherlands, August 31 - September 4.
- Thompson, P., Brooks, K., & Hammett, S. T. (2006). Speed can go up as well as down at low contrast: Implications for models of motion perception. *Vision Research*, *46*, 782-786.
- Thompson, W. B., Willemsen, P., Gooch, A. A., Creem-Regehr, S. H., Loomis, J. M., & Beall, A. C. (2004). Does the quality of the computer graphics matter when judging distances in visually immersive environments? *Presence*, *13*, 560-571.
- Todosiev, E. P., & Fenton, R. E. (1966). Velocity thresholds in car-following at night. *Highway Research Record*, *122*, 94-104.
- Underwood, G., Chapman, P., Crundall, D., Cooper, S., & Wallén, R. (1999). The visual control of steering and driving: Where do we look when negotiating curves? In A.G. Gale et al. (Eds.), *Vision in Vehicles VII* (pp. 245-252). Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V. (North Holland).
- Usher, M., & McClelland, J. L. (2001). The time course of perceptual choice: The leaky competing accumulator model. *Psychological Review*, *108*, 550-592.
- Van Ee, R., Adams, W. J., & Mamassian, P. (2003). Bayesian modeling of cue interaction: bistability in stereoscopic slant perception. *Optical Society of America*, *20*, 1398-1406.

Bibliographie

- Van der Hulst, M. (1999). *Adaptive control of safety margins in driving* (Ph.D. thesis). Groningen, The Netherlands: University of Groningen.
- Van der Hulst, M., Rothengatter, T. & Meijman, T. (1998). Strategic adaptations to lack of preview in driving. *Transportation Research Part F, 1*, 59-75.
- Van Winsum, W. (1999). The human element in car following models. *Transportation Research Part F, 2*, 207-211.
- Van Winsum, W., Brookhuis, K. A., & De Waard, D. (2000). A comparison of different ways to approximate time-to-line crossing (TLC) during car driving. *Accident Analysis and Prevention, 32*, 47-56.
- Van Winsum, W., & Godthelp, H. (1996). Speed choice and steering behavior in curve driving. *Human Factors, 38*, 434-441.
- Van Winsum, W. & Heino, A. (1996). Choice of time headway in car following and the role of time-to-collision information in braking. *Ergonomics, 39*, 579-592.
- Vickers, D. (1970). Evidence for an accumulator of psychophysical discrimination. *Ergonomics, 13*, 37-58.
- Vogel, K. (2003). A comparison of headway and time to collision as safety indicators. *Accident Analysis and Prevention, 35*, 427-433.
- Wallis, G., Chatziastros, A., & Bühlhoff, H. (2002). An unexpected role for visual feedback in vehicle steering control. *Current Biology, 12*, 295-299.
- Wann, J., & Land, M. (2000). Steering with or without the flow: Is the retrieval of heading necessary? *Trends in Cognitive Sciences, 4*, 319-324.
- Warren, W. H., & Fajen, B. R. (2004). Behavioral dynamics of human locomotion. *Ecological Psychology, 16*, 61-66.
- Warren, W. H. Jr., Mestre, D., Blackwell, A. W., & Morris, M. W. (1991). Perception of circular heading from optical flow. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 17*, 28-43.
- White, M. E., & Jeffery, D. J. (1980). *Some aspects of motorway traffic behaviour in fog* (TRRL Report No. 958). Crowthorne, UK: Transport and Road Research Laboratory.
- Wilkie, R. M., & Wann, J. P. (2002). Driving as night falls: The contribution of retinal flow and visual direction to the control of steering. *Current Biology, 12*, 2014-2017.

Bibliographie

- 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*, 363-378.
- Wu, B., Ooi, T. L., & He, Z. J. (2004). Perceiving distance accurately by a directional process of integrating ground information. *Nature*, *428*, 73-77.
- Yang, Z., & Purves, D. (2003). A statistical explanation of visual space. *Nature Neuroscience*, *6*, 632-640.
- Yonas, A., & Zimmerman, L. (2006). *Improving the ability of drivers to avoid collision with snowplows in fog and snow* (Technical report MN/RC-2006-29). St. Paul, MN: Department of Transportation.
- Yu, C., Klein, S. A., & Levi, D. M. (2004). Perceptual learning in contrast discrimination and the (minimal) role of context. *Journal of Vision*, *4*, 169-182.

Annexes

Annexe 1 Feuille d'information, consignes, et questionnaire pour les expériences présentées dans le chapitre 2

1 Feuille d'information

L'expérimentation à laquelle vous allez participer concerne un ensemble d'études sur la conduite automobile en condition de visibilité normale et en condition de brouillard. Nous nous intéressons en particulier à la perception de la distance inter-véhiculaire. L'ensemble de l'expérimentation devrait durer environ 45 minutes.

Pendant l'expérimentation vous serez dans un simulateur de conduite, mais vous n'aurez pas à conduire. Nous simulerons une situation dans laquelle un véhicule sera placé devant vous, et dans différentes conditions de visibilité (Brouillard). Votre tâche consistera à estimer la distance entre vous et le véhicule placé devant vous. Vous n'aurez pas de retour sur la précision de vos estimations.

2 Consignes

Vous êtes dans un simulateur de conduite. Vous allez vous asseoir à la place du conducteur, mais vous ne conduirez pas la voiture.

Vous apercevrez sur l'écran une scène visuelle qui simule une situation dans laquelle vous serez à l'arrêt, et un véhicule également à l'arrêt sera placé devant vous. Vous serez en condition de jour, parfois par temps clair, parfois par temps de brouillard. En condition de brouillard, vous ne percevrez parfois que les feux arrière du véhicule placé devant vous. Ce véhicule est un véhicule léger (voiture) équipé avec un ou deux feux de brouillard.

Votre tâche consiste à estimer la distance qu'il y a entre vous (votre tête) et l'arrière du véhicule placé devant vous. Vous devrez estimer cette distance en mètres, de la façon **la plus précise possible**.

Chaque séquence de visualisation dure 8 secondes. A la fin de ces séquences, un écran intermédiaire vous permettra de reporter votre estimation sur la fiche réponse.

Prévenez moi dès que vous aurez terminé de répondre sur la fiche, et je lancerai l'essai suivant. Un autre véhicule sera alors placé devant vous, et vous devrez effectuer la même tâche.

Nous allons maintenant faire plusieurs essais, pour que vous puissiez vous familiariser avec cette expérimentation.

Avez-vous des questions ?

3 Questionnaire post-expérimental

1. Étiez-vous sûr de vos réponses par temps clair, et en condition de brouillard ?
2. Stratégie utilisée pour déterminer la distance par temps clair, et en condition de brouillard ?
3. Utilisation d'indices ou d'indicateurs permettant de déterminer la distance ?
4. Au début d'un essai, aviez-vous une rémanence de l'image de l'essai précédent ? (hauteur dans l'image, position et taille du véhicule)
5. Les scènes présentées semblaient-elles réalistes ? (environnement, chaussée, véhicules, feux). Cela vous a-t-il gêné ? Étiez-vous immergé dans la scène ?
6. Pratiquez-vous une activité, professionnelle ou sportive, qui implique des estimations de distances ?
7. Avez-vous déjà estimé ou mesuré des distances ? A quelles occasions ?
8. Avez-vous remarqué quelque chose de particulier ?

Annexe 2 Contrebalancement pour les expériences présentées dans le chapitre 2

1 Expérience 1

Ordre de passation des différents blocs pour les 16 participants. Nous utilisons les notations suivantes :

Normale : Condition de visibilité normale

Silhouette-feux : Bloc dont la première moitié est du type brouillard silhouette et dont la seconde moitié est du type brouillard feu

Feux-silhouette : Bloc dont la première moitié est du type brouillard feu et dont la seconde moitié est du type brouillard silhouette

Complexe : Environnement complexe

Simple : Environnement simple

Complexe-clair, Simple-sombre, et Simple-clair correspondent aux associations environnement-couleur_brouillard de même nom.

Annexes

| N° participant | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Bloc 4 | Bloc 5 |
|----------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Participant 1 | Normale Simple | Normale Complexe | Feux-silhouette Complexe-clair | Feux-silhouette Simple-sombre | Feux-silhouette Simple-clair |
| Participant 2 | Normale Simple | Normale Complexe | Silhouette-feux Complexe-clair | Silhouette-feux Simple-sombre | Silhouette-feux Simple-clair |
| Participant 3 | Normale Simple | Normale Complexe | Feux-silhouette Complexe-clair | Feux-silhouette Simple-clair | Feux-silhouette Simple-sombre |
| Participant 4 | Normale Simple | Normale Complexe | Silhouette-feux Complexe-clair | Silhouette-feux Simple-clair | Silhouette-feux Simple-sombre |
| Participant 5 | Normale Complexe | Normale Simple | Feux-silhouette Simple-sombre | Feux-silhouette Simple-clair | Feux-silhouette Complexe-clair |
| Participant 6 | Normale Complexe | Normale Simple | Silhouette-feux Simple-sombre | Silhouette-feux Simple-clair | Silhouette-feux Complexe-clair |
| Participant 7 | Normale Complexe | Normale Simple | Feux-silhouette Simple-clair | Feux-silhouette Simple-sombre | Feux-silhouette Complexe-clair |
| Participant 8 | Normale Complexe | Normale Simple | Silhouette-feux Simple-clair | Silhouette-feux Simple-sombre | Silhouette-feux Complexe-clair |
| Participant 9 | Feux-silhouette Complexe-clair | Feux-silhouette Simple-sombre | Feux-silhouette Simple-clair | Normale Simple | Normale Complexe |
| Participant 10 | Silhouette-feux Complexe-clair | Silhouette-feux Simple-sombre | Silhouette-feux Simple-clair | Normale Simple | Normale Complexe |
| Participant 11 | Feux-silhouette Complexe-clair | Feux-silhouette Simple-clair | Feux-silhouette Simple-sombre | Normale Simple | Normale Complexe |
| Participant 12 | Silhouette-feux Complexe-clair | Silhouette-feux Simple-clair | Silhouette-feux Simple-sombre | Normale Simple | Normale Complexe |
| Participant 13 | Feux-silhouette Simple-sombre | Feux-silhouette Simple-clair | Feux-silhouette Complexe-clair | Normale Complexe | Normale Simple |
| Participant 14 | Silhouette-feux Simple-sombre | Silhouette-feux Simple-clair | Silhouette-feux Complexe-clair | Normale Complexe | Normale Simple |
| Participant 15 | Feux-silhouette Simple-clair | Feux-silhouette Simple-sombre | Feux-silhouette Complexe-clair | Normale Complexe | Normale Simple |
| Participant 16 | Silhouette-feux Simple-clair | Silhouette-feux Simple-sombre | Silhouette-feux Complexe-clair | Normale Complexe | Normale Simple |

Tableau 11 : Contrebalancement pour la première expérience portant sur les estimations de l'interdistance (présentée au chapitre 2).

2 Expérience 2

Le tableau ci-dessous indique l'ordre de passation des différents blocs expérimentaux de l'expérience 2 du chapitre 2. La première ligne de chaque cellule indique la condition de visibilité et la seconde ligne indique l'environnement utilisé. Les abréviations utilisées dans le tableau sont les suivantes :

- Normale : Condition de visibilité normale
 Silhouette : Condition de visibilité brouillard silhouette
 Feux : Condition de visibilité brouillard feux
 Uniforme : Environnement uniforme
 Chaussée : Environnement avec chaussée

| N° participant | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Bloc 4 | Bloc 5 | Bloc 6 |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Participant 1 | Normale Uniforme | Normale Chaussée | Silhouette Uniforme | Silhouette Chaussée | Feux Uniforme | Feux Chaussée |
| Participant 2 | Normale Chaussée | Normale Uniforme | Silhouette Chaussée | Silhouette Uniforme | Feux Chaussée | Feux Uniforme |
| Participant 3 | Normale Uniforme | Normale Chaussée | Feux Uniforme | Feux Chaussée | Silhouette Uniforme | Silhouette Chaussée |
| Participant 4 | Normale Chaussée | Normale Uniforme | Feux Chaussée | Feux Uniforme | Silhouette Chaussée | Silhouette Uniforme |
| Participant 5 | Silhouette Uniforme | Silhouette Chaussée | Feux Uniforme | Feux Chaussée | Normale Uniforme | Normale Chaussée |
| Participant 6 | Silhouette Chaussée | Silhouette Uniforme | Feux Chaussée | Feux Uniforme | Normale Chaussée | Normale Uniforme |
| Participant 7 | Feux Uniforme | Feux Chaussée | Silhouette Uniforme | Silhouette Chaussée | Normale Uniforme | Normale Chaussée |
| Participant 8 | Feux Chaussée | Feux Uniforme | Silhouette Chaussée | Silhouette Uniforme | Normale Chaussée | Normale Uniforme |

Tableau 12 : Contrebalancement pour la seconde expérience portant sur les estimations de l'interdistance (présentée au chapitre 2).

Annexe 3 Feuille d'information, consignes, et questionnaire pour les expériences présentées dans le chapitre 3

1 Feuille d'information

L'expérimentation à laquelle vous allez participer concerne un ensemble d'études sur la conduite automobile en condition de visibilité normale et en condition de brouillard. Nous nous intéressons en particulier à la détection de l'éloignement ou du rapprochement d'un véhicule suivi. L'expérimentation sera réalisée en deux sessions d'environ une heure, qui auront lieu deux jours différents. Plusieurs pauses sont prévues, et il sera possible de faire des pauses supplémentaires lorsque vous le souhaitez.

Pour les deux sessions, vous serez installé(e) dans un simulateur de conduite mais vous n'aurez pas à conduire. Dans un premier temps nous ferons apparaître un véhicule à l'écran, et votre tâche consistera dès que vous le détecterez à appuyer sur le bouton approprié en fonction de l'endroit où il est apparu. Dans un second temps, nous simulerons une situation de suivi de véhicule dans différentes conditions de visibilité (brouillard). Votre tâche consistera à appuyer sur le bouton approprié dès que vous détecterez le rapprochement ou l'éloignement du véhicule suivi. Durant toute l'expérience, vous n'aurez pas de retour sur l'exactitude de vos réponses.

2 Consignes

Vous êtes dans un simulateur de conduite. Vous allez vous asseoir à la place du conducteur, mais vous ne conduirez pas la voiture. Vous apercevrez sur l'écran une scène visuelle qui simule une situation dans laquelle vous suivrez un autre véhicule. Vous serez en condition de jour, parfois par temps clair, parfois par temps de brouillard. En condition de brouillard, vous ne percevrez parfois que les feux arrière du véhicule suivi.

Après un certain temps, le véhicule suivi commencera à se rapprocher ou à s'éloigner. Votre tâche consiste à appuyer sur le bouton approprié dès que vous percevez le sens du mouvement. Le bouton le plus proche de vous correspond au rapprochement et le bouton le plus éloigné correspond à l'éloignement. Il est important de répondre **le plus vite possible** et **sans faire d'erreur**. Il faudra donc être très concentré(e).

Quand vous aurez répondu, le véhicule disparaîtra de l'écran. Quelques instants après, un autre véhicule apparaîtra devant vous et vous devrez effectuer la même tâche.

Nous allons maintenant faire deux séries d'une dizaine d'essais pour que vous puissiez vous familiariser avec cette expérimentation.

Avez-vous des questions ?

3 Questionnaire post-expérimental

1. Avez-vous utilisé une/des stratégie(s) particulière(s) ?
2. Quels sont les indices ou informations que vous avez utilisé ? (pour quelles conditions ?)
3. Pour réaliser la tâche demandée, le brouillard vous a-t-il gêné, aidé, ou est-ce qu'il n'a pas eu d'influence ? (pour quelles conditions ?)
4. La difficulté à effectuer la tâche demandée était-elle la même ou était-elle différente pour les différentes conditions ? (Vitesse du mouvement, distance du véhicule)
5. Répondiez-vous avec le même niveau de certitude pour les différentes conditions, ou était-il différent ?
6. Vous êtes-vous senti immergé(e) dans la scène visuelle ? (pour quelles conditions ?)
7. Avez-vous eu la sensation de vous déplacer (comme dans une voiture qui roule), ou la sensation d'être immobile (comme devant un écran) ? (pour quelles conditions ?)
8. Pensez-vous avoir été attentif toute la durée de l'expérience ?
9. Etait-il difficile de rester attentif ?
10. Avez-vous des remarques ou des suggestions ?

Annexe 4 Contrebalancement pour la première expérience présentée dans le chapitre 3

La seule variable contrebalancée est la variable contraste, avec quatre modalités :

- 89.3% : Sans brouillard
- 18.9% : Brouillard avec un contraste de 18.9% entre la silhouette et le fond
- 5.7% : Brouillard avec un contraste de 5.7% entre la silhouette et le fond
- 0.4% : Brouillard avec le véhicule visible uniquement par ses feux (contraste de 0.4% entre la silhouette et le fond)

| N° participant | 1 ^{ère} session | | 2 ^{ème} session | |
|----------------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|
| | | | | |
| Participant 1 | 89.3% | 5.7% | 18.9% | 0.4% |
| Participant 2 | 0.4% | 89.3% | 5.7% | 18.9% |
| Participant 3 | 18.9% | 0.4% | 89.3% | 5.7% |
| Participant 4 | 5.7% | 18.9% | 0.4% | 89.3% |
| Participant 5 | 89.3% | 0.4% | 18.9% | 5.7% |
| Participant 6 | 5.7% | 89.3% | 0.4% | 18.9% |
| Participant 7 | 18.9% | 5.7% | 89.3% | 0.4% |
| Participant 8 | 0.4% | 18.9% | 5.7% | 89.3% |
| Participant 9 | 89.3% | 18.9% | 5.7% | 0.4% |
| Participant 10 | 5.7% | 0.4% | 89.3% | 18.9% |
| Participant 11 | 18.9% | 89.3% | 0.4% | 5.7% |
| Participant 12 | 0.4% | 5.7% | 18.9% | 89.3% |

Tableau 13 : Contrebalancement de la variable contraste pour la première expérience portant sur la sensibilité au mouvement relatif (présentée au chapitre 3). L'ordre de passation des quatre modalités de la variable contraste au cours des deux sessions est présenté pour les 12 participants.

Puisque les deux sessions étaient passées des jours différents et que la seconde session commençait par deux blocs d'entraînement, nous émettons l'hypothèse que l'ordre de passage des deux modalités de la première session n'influence pas les résultats de la seconde session. Nous avons alors décidé de ne pas réaliser un contrebalancement complet. La sélection des modalités attribuées à chaque session est totalement contrebalancée, mais le

Annexes

contrebalancement interne aux sessions n'est pas réalisé de façon indépendante pour les deux sessions.

Annexe 5 Limites du système d'affichage vis-à-vis des résultats présentés dans le chapitre 3

La résolution du système d'affichage utilisé pour les expériences est limitée par rapport à l'acuité du système visuel humain. Selon Padmos et Milders (1992), il faudrait idéalement que les systèmes d'affichage aient une résolution de 90 pixels par degré, soit 0.67 minutes d'arc par pixel pour afficher tous les détails perceptibles par le système visuel humain. En ce qui concerne la sensibilité aux petits déplacements, plusieurs auteurs montrent que l'on peut dans certaines conditions détecter des déplacements dans le plan frontoparallèle inférieurs à 1 minute d'arc (Sumnall & Harris, 2002 ; Bonnet, 1975). Or, le système d'affichage du simulateur utilisé pour ces expériences avait une résolution de 2.7 minutes d'arc par pixel.

Pour savoir si la résolution limitée du système d'affichage a pu avoir des conséquences sur le temps de réponse, nous avons calculé à partir des résultats, la plus petite différence observée entre la taille angulaire initiale et la taille angulaire à l'instant de la discrimination (i.e. en soustrayant les temps de sélection de la réponse et d'exécution motrice tel que nous l'avons fait précédemment). Cette valeur minimale est observée pour les plus grandes interdistances, et est de 5.7 minutes d'arc pour la première expérience et de 7.5 minutes d'arc pour la seconde expérience, ce qui correspond approximativement à la largeur de deux ou trois pixels. L'interaction entre l'interdistance et le sens du mouvement apparue lors de la seconde expérience (Figure 37-droite, page 115) pourrait révéler l'existence d'un changement de taille angulaire minimum (i.e. un seuil) pour que le mouvement soit détecté. On observe en effet pour la plus grande interdistance (64 m), un temps de réponse plus long pour l'éloignement que pour le rapprochement, ce qui semble être lié au changement de taille angulaire plus petit pour l'éloignement. Cette différence est d'autre part indépendante de la condition de visibilité, ce qui est incohérent avec les autres résultats.

Par ailleurs, la différence entre la taille angulaire initiale et la taille angulaire à l'instant de la discrimination est plus petite par temps clair qu'en condition de brouillard, puisque le seuil y est plus bas. Cela signifie que si la résolution limitée de l'écran conduisait à augmenter artificiellement le seuil de discrimination, cette augmentation aurait lieu en particulier pour la condition de temps clair. Selon cette hypothèse, l'influence observée du brouillard sur le seuil

Annexes

de perception aurait été artificiellement réduite. L'augmentation du seuil de perception avec le brouillard que nous avons observée lors de ces expériences n'est donc pas remise en cause.

Annexe 6 Profil de vitesse du véhicule lièvre utilisé pour l'expérience décrite dans les chapitres 4 et 5

Dans le but de construire le profil de vitesse du véhicule lièvre, six participants ont réalisé trois tours de circuit de la route sinueuse en conduite libre. Il leur était demandé de rouler comme ils l'auraient fait en situation réelle. Leur position et leur vitesse étaient enregistrées. Sur l'ensemble des tours de circuit enregistrés huit ont été conservés. Les autres ont été écartés, soit parce que la vitesse moyenne variait trop entre le début et la fin du tour, soit parce que la conduite était très saccadée. A partir des tours de circuit conservés, nous avons calculé la vitesse moyenne en chaque position du circuit (tous les mètres). La vitesse calculée en fonction de la position a ensuite été travaillée de façon à satisfaire plusieurs contraintes :

1. Nous souhaitons d'abord que les variations de vitesse elles-mêmes aient des fréquences et amplitudes réalistes. Le principal critère de jugement est la cohérence entre les virages rencontrés et les variations de vitesse correspondantes.
2. Nous souhaitons que le comportement du véhicule lièvre soit réaliste du point de vue des accélérations pratiquées. Les accélérations résultant des variations de vitesse ont donc été calculées. L'idéal est d'avoir des accélérations positives limitées, qui restent ainsi compatibles avec les capacités d'accélération d'un véhicule réel. Il est d'autre part souhaitable que les décélérations soient également limitées puisque les feux stop resteront éteints. Les décélérations doivent donc rester à des valeurs qui permettent de croire qu'elles sont dues au frein moteur. Les travaux de Kuje, Yamamura, Boer, Ward, et Manser (2006) montrent que les accélérations sont généralement inférieures à $\pm 1.5 \text{ m/s}^2$ en situation de suivi de véhicule.
3. Puisque nous étudions le contrôle de l'intervalle, nous souhaitons que les variations de vitesse du véhicule lièvre obligent les participants à réagir au rapprochement ou à l'éloignement du véhicule suivi. Pour ce faire, nous avons calculé les variations de la distance intervéhiculaire qui résultent des variations de vitesse, en supposant que la vitesse du véhicule suiveur reste constante. L'idéal est d'avoir plusieurs rapprochements et éloignements du même ordre de grandeur ou plus grands que les interdistances pratiquées. En supposant que l'intervalle moyen est d'environ 2 s alors l'interdistance est en moyenne de 42 m pour une vitesse moyenne de 21.3 m/s.

Nous venons de voir que différentes contraintes portent sur les variations de vitesse du véhicule lièvre, sur ses accélérations, et également sur les variations de l'interdistance. Or, ces trois grandeurs sont directement liées puisque l'accélération est la dérivée temporelle de la vitesse, et que les variations de l'interdistance correspondent à son intégration. De ce fait, il n'est pas possible de modifier l'une de ces grandeurs sans affecter les deux autres. Pour tenter de satisfaire ces contraintes, il existe deux leviers. Le premier est la fréquence des variations de vitesse. Or, cette fréquence dépend directement de la durée entre les événements successifs ou autrement dit de la distance entre les virages. Puisque le tracé du circuit est figé, il n'est pas possible d'utiliser ce levier. L'autre levier, que nous allons utiliser, est l'amplitude des variations. Pour satisfaire les différentes contraintes, l'amplitude des variations de vitesse a été multipliée par 2.5 par rapport à celles qui avaient été enregistrées. De plus, les variations de vitesse ont été écrêtées lorsqu'elles étaient inférieures à la vitesse moyenne de plus de 6 m/s. Enfin, les accélérations et décélérations ont respectivement été écrêtées à $+1 \text{ m/s}^2$ et -1.5 m/s^2 . Les variations de vitesse ont ensuite été appliquées à la vitesse moyenne souhaitée de façon additive. Les variations de vitesses ont ainsi la même amplitude quelle que soit la vitesse moyenne. De même, les variations de l'interdistance par rapport à un véhicule ayant une vitesse constante et les accélérations sont également indépendantes de la vitesse moyenne choisie. Les variations de vitesse résultant de ce traitement sont comprises entre -6 et $+4.8 \text{ m/s}$ autour de la vitesse moyenne choisie (Figure 84) et les accélérations sont comprises entre -1.5 et $+1 \text{ m/s}^2$ (Figure 85). La Figure 86 présente la variation de l'interdistance par rapport à un véhicule suiveur ayant une vitesse constante. On constate que des variations de plusieurs dizaines de mètres apparaissent régulièrement. Il y a d'autre part une variation sur l'ensemble du circuit (basse fréquence) dont l'amplitude est beaucoup plus grande. Enfin la Figure 87 représente le profil de vitesse tel qu'il a été programmé sur le simulateur. Les 355 points noirs correspondent aux vitesses qui ont effectivement été programmées à des positions données du circuit. Entre ces positions, le véhicule lièvre adopte une accélération constante. Le choix des points à programmer a été fait par un algorithme *ad hoc* se basant sur le jerk (dérivée seconde de la vitesse).

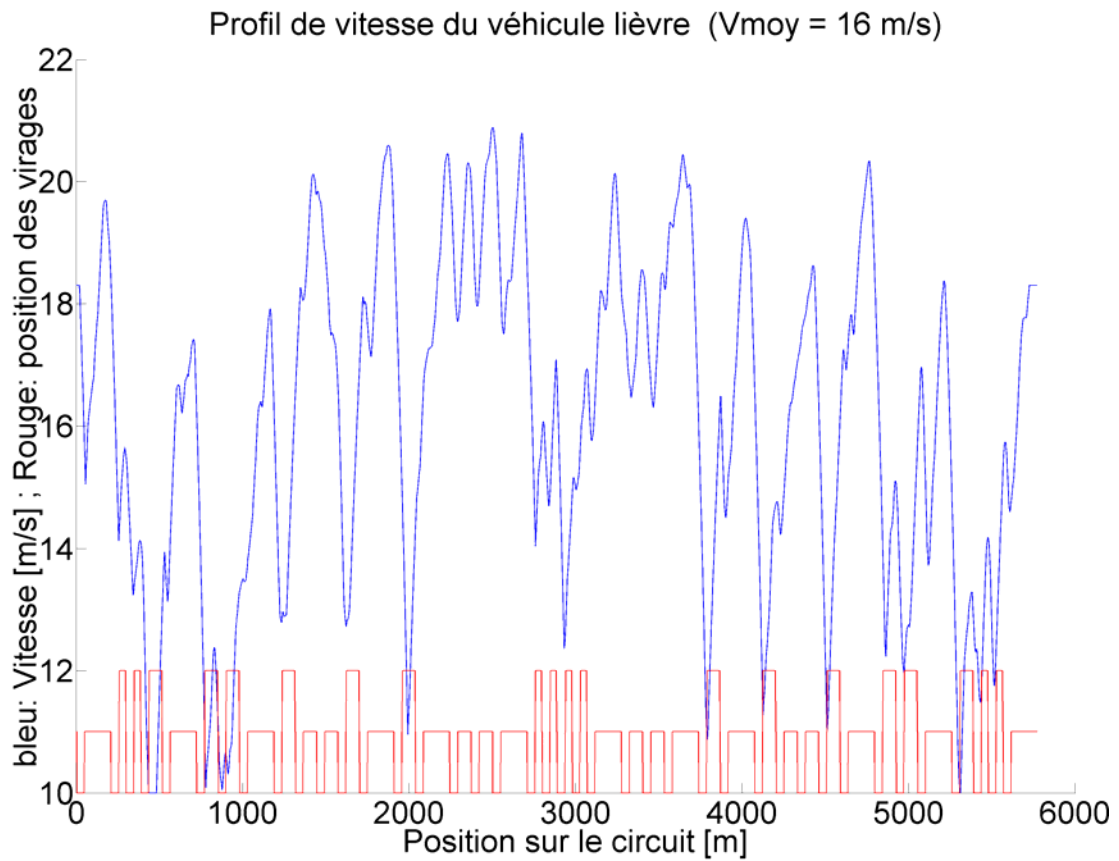


Figure 84 : Tracé bleu : Vitesse du véhicule lièvre en fonction de sa position sur le circuit dans le cas où la vitesse moyenne est 16 m/s. Tracé rouge : Position des virages, à interpréter de la façon suivante : 10 correspond à une ligne droite, 11 correspond à un rayon de courbure de 200 m, et 12 correspond à un rayon de courbure de 100 m.

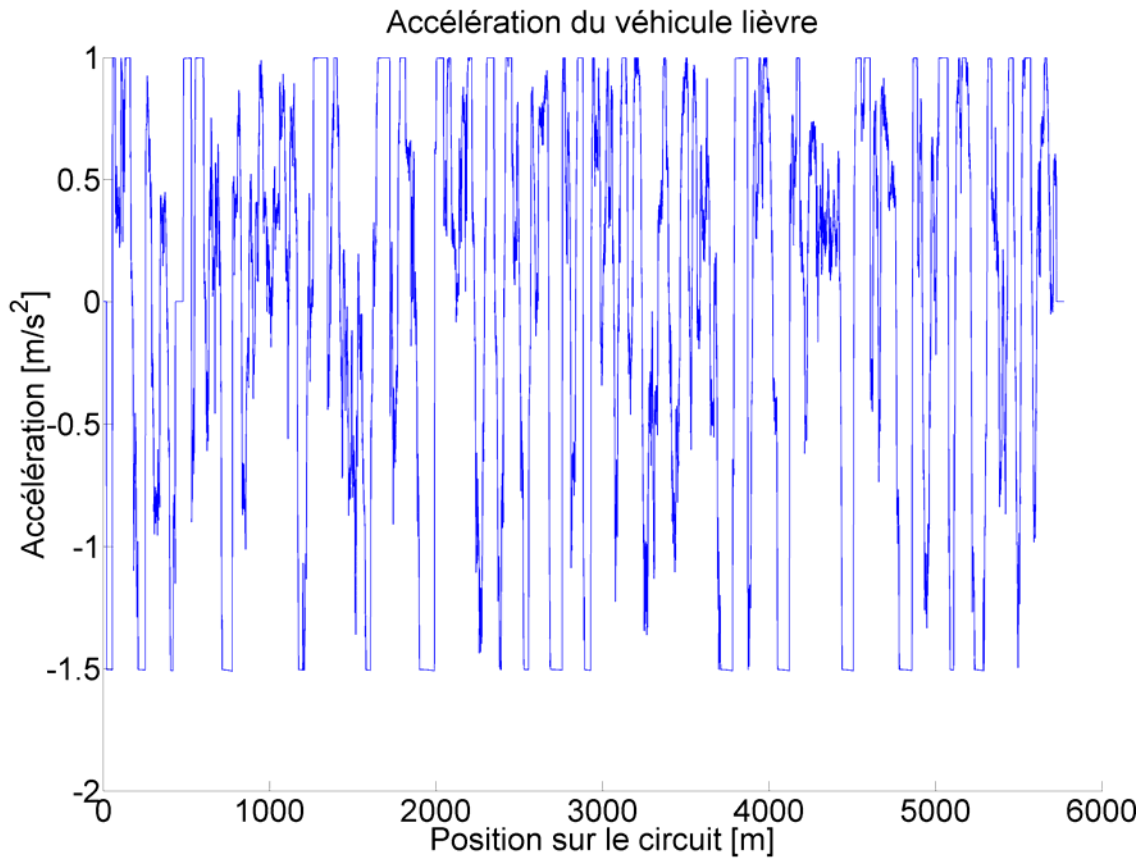


Figure 85 : Accélération du véhicule lièvre en fonction de sa position sur le circuit.

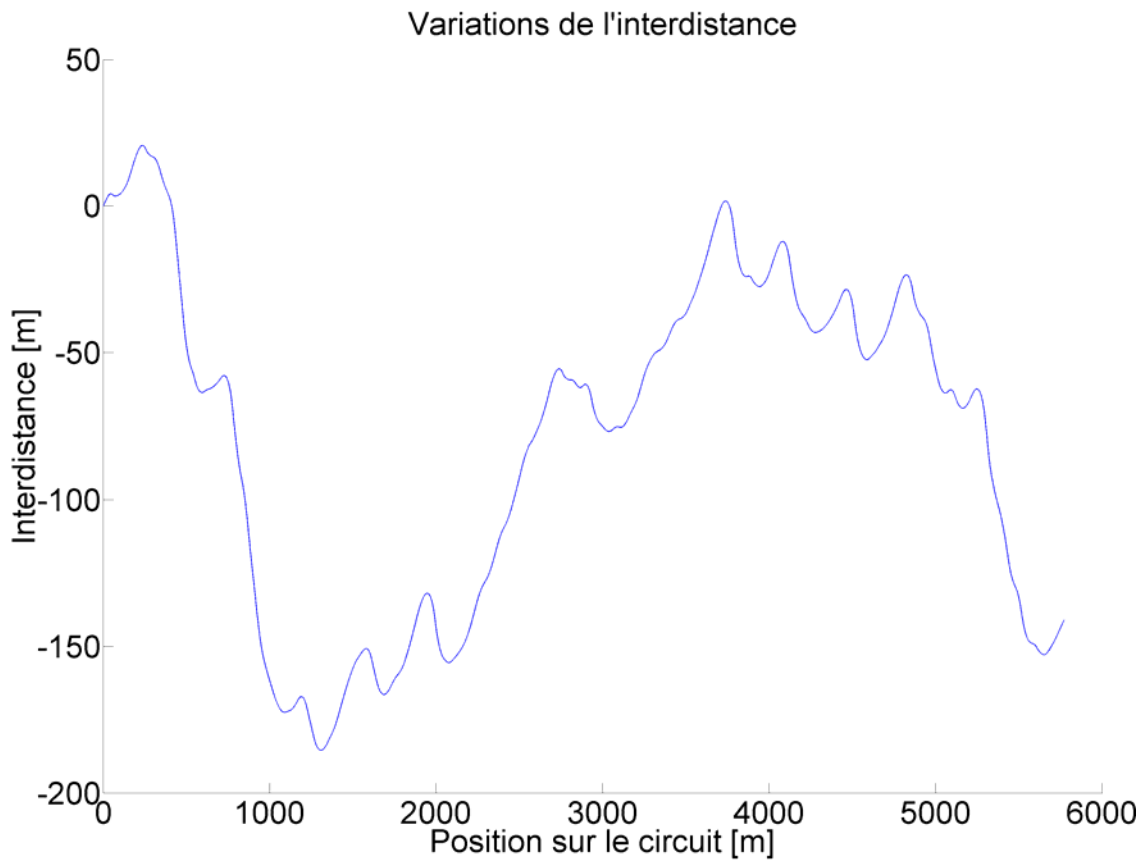


Figure 86 : Interdistance par rapport à un véhicule suiveur ayant une vitesse constante en fonction de la position sur le circuit. Cette figure permet de visualiser les variations de l'interdistance, qui est arbitrairement fixée à 0 au début du circuit.

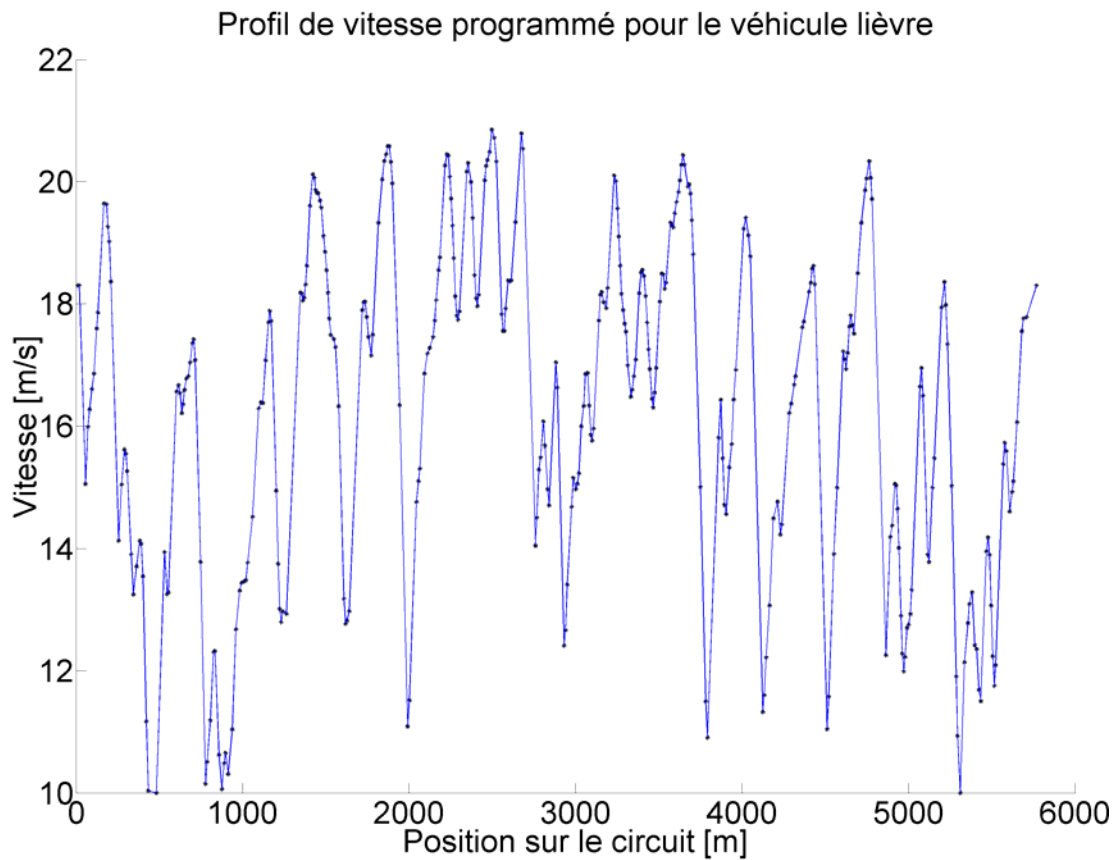


Figure 87 : Vitesse du véhicule lièvre en fonction de sa position sur le circuit dans le cas où la vitesse moyenne est 16 m/s. Les points noirs représentent les coordonnées qui ont été programmées sur le simulateur. Le choix de ces points a été fait par un algorithme ad hoc se basant sur le jerk (dérivée seconde de la vitesse).

Annexe 7 Feuille d'information, consignes, et questionnaire utilisés pour l'expérience décrite dans les chapitres 4 et 5

1 Feuille d'information

L'expérimentation à laquelle vous allez participer concerne un ensemble d'études sur la conduite automobile en condition de visibilité normale et en condition de brouillard. Nous nous intéressons en particulier aux situations de suivi de véhicule. L'expérimentation devrait durer environ deux heures trente (dans certains cas elle durera une quarantaine de minutes). Des pauses sont prévues, et il sera possible de faire des pauses supplémentaires lorsque vous le souhaiterez.

Vous serez installé(e) dans un simulateur de conduite à la place du conducteur. Votre tâche consistera à suivre un autre véhicule qui sera devant vous. Pour le suivre, vous pourrez utiliser les commandes de la voiture dans laquelle vous serez assis(e).

Il est possible que l'expérience sur simulateur de conduite provoque un état nauséux (mal des transports). Si c'était le cas, l'expérience serait arrêtée dès l'apparition des symptômes.

2 Consignes

Vous êtes dans un simulateur de conduite et êtes assis(e) à la place du conducteur. Vous apercevez sur l'écran un environnement simulé qui comporte une route et un véhicule placé sur cette route comme s'il était devant vous.

Vous êtes invité(e) à déjeuner chez des amis. Comme ils viennent d'emménager, vous ne connaissez pas la route à emprunter pour vous y rendre. Le conducteur du véhicule placé devant vous est également l'un de vos amis et est aussi invité à ce déjeuner. Il connaît la route à emprunter et va donc vous guider jusque chez vos amis communs.

Vous devrez le suivre sans le perdre de vue et en empêchant qu'un autre véhicule puisse s'intercaler entre vous. Pour suivre ce véhicule, vous pourrez utiliser les commandes de la voiture dans laquelle vous êtes assis(e) : pédales, volant, levier de vitesse.

Les conditions de visibilité seront parfois bonnes et parfois en condition de brouillard. Cette première séquence est prévue pour que vous puissiez vous familiariser avec les commandes et le comportement de votre véhicule.

Si vous vous sentez mal pendant l'expérience, dites-le, et on arrêtera l'expérience.

Je rappelle la consigne : Il faut suivre la voiture qui est devant vous, sans la perdre de vue, et en empêchant qu'un autre véhicule puisse s'intercaler entre vous.

Vous pouvez maintenant démarrer le moteur en tournant la clé de contact... Lorsque vous serez prêt(e), vous pourrez faire un appel de phare en tirant sur la manette de gauche, et la voiture partira.

Avez vous des questions ?

3 Questionnaire post-expérimental

N° participant :

Date :

Heure :

| | |
|--|--|
| <p style="text-align: center;"><i>Acuité visuelle de loin</i></p> <p style="text-align: center;">2 4 6 8 10 12</p> <p>Binoculaire : 2 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p>Œil Droit : 20 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p>Œil Gauche : 21 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> | <p><i>Champ visuel, Code 8</i></p> <p>11 : 60° D&G <input type="checkbox"/> 1 : 45° D bas <input type="checkbox"/> 3 : Centre haut <input type="checkbox"/></p> <p>22 : 90° D&G <input type="checkbox"/> 2 : 45° D haut <input type="checkbox"/> 4 : Centre bas <input type="checkbox"/></p> |
| <p>Age :</p> <p>Taille :</p> <p>Droitier/gaucher :</p> <p>Correction visuelle :</p> | <p>TIV_{min} : TIV_{max} : TIV_{moy} :</p> <p>Score MSQ :</p> <p style="text-align: center;">Le simulateur vous a-t-il rendu malade ?</p> <p style="text-align: center;">Pas du tout 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/> Beaucoup</p> |
| <p>Combien de fois estimez vous avoir déjà conduit par temps de brouillard ?</p> <p><input type="checkbox"/> 0 à 5 fois <input type="checkbox"/> 11 à 20 fois <input type="checkbox"/> 51 à 100 fois</p> <p><input type="checkbox"/> 6 à 10 fois <input type="checkbox"/> 21 à 50 fois <input type="checkbox"/> Plus de 100 fois</p> | <p>Années de permis :</p> <p>Nb km par an :</p> |

1. En quoi vous seriez-vous comporté différemment en situation réelle ? Et concernant l'intervalle ?
2. Avez vous eu la sensation de vous déplacer (comme dans une voiture qui roule), ou la sensation d'être immobile (devant un écran) ?
3. Etait-il facile/difficile de rester attentif toute la durée de l'expérience ? Etait-ce fatiguant ?
4. Avez-vous des remarques ou des suggestions ?

Annexe 8 Contrebalancement pour l'expérience décrite dans les chapitres 4 et 5

L'ordre de passation a été contrebalancé selon la condition de visibilité, puis selon le type de contrôle prédominant (contrôle de l'intervalle, de trajectoire, ou les deux). Enfin, les trois conditions de *Ligne Droite* (contrôle de l'intervalle prédominant) ont été présentées dans l'ordre d'une vitesse moyenne croissante ou décroissante. Nous obtenons ainsi 24 ordres différents ($=2 \times 6 \times 2$) qui sont présentés dans le tableau ci-dessous. Chaque ligne correspond à l'ordre de passation pour deux participants. L'ordre de passation des conditions expérimentales correspond à la lecture des cellules de gauche à droite. Voici la liste des abréviations utilisées :

| | |
|-----------|--|
| Famil. | Séquence (ou période) de familiarisation |
| Particip. | Participants, suivi des numéro de participants concernés |
| Sbr | Conditions <i>Sans Brouillard</i> |
| Br | Conditions avec <i>Brouillard</i> |
| LD | Conditions de <i>Ligne Droite</i> |
| RS | Condition de <i>Route Sinueuse</i> |
| V1 | Vitesse variable autour de la vitesse moyenne basse (12.8 m/s) |
| V2 | Vitesse variable autour de la vitesse moyenne intermédiaire (16 m/s) |
| V3 | Vitesse variable autour de la vitesse moyenne élevée (21.3 m/s) |
| VC | Vitesse constante (16 m/s) |

Pour faciliter la lecture du tableau, les cellules correspondant aux conditions de *Ligne Droite* ont une couleur de fond grise et les cellules correspondant aux conditions de *Vitesse Variable* sur *Route Sinueuse* ont une couleur de fond verte. Les 12 premières lignes présentent les ordres de passation commençant pas la condition *Sans brouillard* et les 12 lignes suivantes

Annexes

présentent les ordres commençant par la condition de *Brouillard*. De plus, les ordres sont présentés par paires (deux lignes successives), avec les vitesses moyennes dans l'ordre croissant pour l'un, et dans l'ordre décroissant pour l'autre.

Tableau 14 (présenté à la page suivante) : Contrebalancement pour l'expérience de suivi de véhicule (présentée aux chapitres 4 et 5).

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Particip. 1, 25 | Famil. Sbr | Famil. Br | Sbr LD V1 | Sbr LD V2 | Sbr LD V3 | Sbr RS VC | Sbr RS V2 | Br LD V1 | Br LD V2 | Br LD V3 | Br RS VC | Br RS V2 |
| Particip. 2, 26 | Famil. Sbr | Famil. Br | Sbr LD V3 | Sbr LD V2 | Sbr LD V1 | Sbr RS VC | Sbr RS V2 | Br LD V3 | Br LD V2 | Br LD V1 | Br RS VC | Br RS V2 |
| Particip. 3, 27 | Famil. Sbr | Famil. Br | Sbr LD V1 | Sbr LD V2 | Sbr LD V3 | Sbr RS V2 | Sbr RS VC | Br LD V1 | Br LD V2 | Br LD V3 | Br RS V2 | Br RS VC |
| Particip. 4, 28 | Famil. Sbr | Famil. Br | Sbr LD V3 | Sbr LD V2 | Sbr LD V1 | Sbr RS V2 | Sbr RS VC | Br LD V3 | Br LD V2 | Br LD V1 | Br RS V2 | Br RS VC |
| Particip. 5, 29 | Famil. Sbr | Famil. Br | Sbr RS VC | Sbr LD V1 | Sbr LD V2 | Sbr LD V3 | Sbr RS V2 | Br RS VC | Br LD V1 | Br LD V2 | Br LD V3 | Br RS V2 |
| Particip. 6, 30 | Famil. Sbr | Famil. Br | Sbr RS VC | Sbr LD V3 | Sbr LD V2 | Sbr LD V1 | Sbr RS V2 | Br RS VC | Br LD V3 | Br LD V2 | Br LD V1 | Br RS V2 |
| Particip. 7, 31 | Famil. Sbr | Famil. Br | Sbr RS V2 | Sbr LD V1 | Sbr LD V2 | Sbr LD V3 | Sbr RS VC | Br RS V2 | Br LD V1 | Br LD V2 | Br LD V3 | Br RS VC |
| Particip. 8, 32 | Famil. Sbr | Famil. Br | Sbr RS V2 | Sbr LD V3 | Sbr LD V2 | Sbr LD V1 | Sbr RS VC | Br RS V2 | Br LD V3 | Br LD V2 | Br LD V1 | Br RS VC |
| Particip. 9, 33 | Famil. Sbr | Famil. Br | Sbr RS VC | Sbr RS V2 | Sbr LD V1 | Sbr LD V2 | Sbr LD V3 | Br RS VC | Br RS V2 | Br LD V1 | Br LD V2 | Br LD V3 |
| Particip. 10, 34 | Famil. Sbr | Famil. Br | Sbr RS VC | Sbr RS V2 | Sbr LD V3 | Sbr LD V2 | Sbr LD V1 | Br RS VC | Br RS V2 | Br LD V3 | Br LD V2 | Br LD V1 |
| Particip. 11, 35 | Famil. Sbr | Famil. Br | Sbr RS V2 | Sbr RS VC | Sbr LD V1 | Sbr LD V2 | Sbr LD V3 | Br RS V2 | Br RS VC | Br LD V1 | Br LD V2 | Br LD V3 |
| Particip. 12, 36 | Famil. Sbr | Famil. Br | Sbr RS V2 | Sbr RS VC | Sbr LD V3 | Sbr LD V2 | Sbr LD V1 | Br RS V2 | Br RS VC | Br LD V3 | Br LD V2 | Br LD V1 |
| Particip. 13, 37 | Famil. Sbr | Famil. Br | Br LD V1 | Br LD V2 | Br LD V3 | Br RS VC | Br RS V2 | Sbr LD V1 | Sbr LD V2 | Sbr LD V3 | Sbr RS VC | Sbr RS V2 |
| Particip. 14, 38 | Famil. Sbr | Famil. Br | Br LD V3 | Br LD V2 | Br LD V1 | Br RS VC | Br RS V2 | Sbr LD V3 | Sbr LD V2 | Sbr LD V1 | Sbr RS VC | Sbr RS V2 |
| Particip. 15, 39 | Famil. Sbr | Famil. Br | Br LD V1 | Br LD V2 | Br LD V3 | Br RS V2 | Br RS VC | Sbr LD V1 | Sbr LD V2 | Sbr LD V3 | Sbr RS V2 | Sbr RS VC |
| Particip. 16, 40 | Famil. Sbr | Famil. Br | Br LD V3 | Br LD V2 | Br LD V1 | Br RS V2 | Br RS VC | Sbr LD V3 | Sbr LD V2 | Sbr LD V1 | Sbr RS V2 | Sbr RS VC |
| Particip. 17, 41 | Famil. Sbr | Famil. Br | Br RS VC | Br LD V1 | Br LD V2 | Br LD V3 | Br RS V2 | Sbr RS VC | Sbr LD V1 | Sbr LD V2 | Sbr LD V3 | Sbr RS V2 |
| Particip. 18, 42 | Famil. Sbr | Famil. Br | Br RS VC | Br LD V3 | Br LD V2 | Br LD V1 | Br RS V2 | Sbr RS VC | Sbr LD V3 | Sbr LD V2 | Sbr LD V1 | Sbr RS V2 |
| Particip. 19, 43 | Famil. Sbr | Famil. Br | Br RS V2 | Br LD V1 | Br LD V2 | Br LD V3 | Br RS VC | Sbr RS V2 | Sbr LD V1 | Sbr LD V2 | Sbr LD V3 | Sbr RS VC |
| Particip. 20, 44 | Famil. Sbr | Famil. Br | Br RS V2 | Br LD V3 | Br LD V2 | Br LD V1 | Br RS VC | Sbr RS V2 | Sbr LD V3 | Sbr LD V2 | Sbr LD V1 | Sbr RS VC |
| Particip. 21, 45 | Famil. Sbr | Famil. Br | Br RS VC | Br RS V2 | Br LD V1 | Br LD V2 | Br LD V3 | Sbr RS VC | Sbr RS V2 | Sbr LD V1 | Sbr LD V2 | Sbr LD V3 |
| Particip. 22, 46 | Famil. Sbr | Famil. Br | Br RS VC | Br RS V2 | Br LD V3 | Br LD V2 | Br LD V1 | Sbr RS VC | Sbr RS V2 | Sbr LD V3 | Sbr LD V2 | Sbr LD V1 |
| Particip. 23, 47 | Famil. Sbr | Famil. Br | Br RS V2 | Br RS VC | Br LD V1 | Br LD V2 | Br LD V3 | Sbr RS V2 | Sbr RS VC | Sbr LD V1 | Sbr LD V2 | Sbr LD V3 |
| Particip. 24, 48 | Famil. Sbr | Famil. Br | Br RS V2 | Br RS VC | Br LD V3 | Br LD V2 | Br LD V1 | Sbr RS V2 | Sbr RS VC | Sbr LD V3 | Sbr LD V2 | Sbr LD V1 |

Résumé

Les statistiques mettent en évidence une augmentation importante du risque et de la gravité des accidents par temps de brouillard. Par ailleurs, les études de trafic menées sur autoroute montrent généralement une réduction des intervalles par temps de brouillard et indiquent que cette réduction ne peut pas être expliquée uniquement par la nécessité de garder le contact visuel avec le véhicule lièvre. Partant de ce constat, nous avons cherché à mieux comprendre les causes de la diminution des intervalles par temps de brouillard. Nous avons testé trois hypothèses selon lesquelles le brouillard affecte les mécanismes perceptifs et perceptivo-moteurs impliqués dans la régulation de l'intervalle et dans le contrôle de la trajectoire.

La première hypothèse est celle d'une surestimation de la distance intervéhiculaire en condition de brouillard. Les travaux antérieurs ayant montré une surestimation importante de la distance intervéhiculaire en condition de brouillard très dense, nous avons cherché à préciser les conditions d'apparition de ce phénomène à travers deux expérimentations de jugement perceptif. Nos résultats montrent que la surestimation se limite aux conditions de brouillard extrêmement dense où très peu d'indices de distance sont disponibles. La réduction des intervalles par temps de brouillard ne peut donc pas être expliquée par une surestimation de la distance intervéhiculaire.

La seconde hypothèse étudiée concerne la sensibilité au mouvement relatif (i.e., l'éloignement ou le rapprochement du véhicule lièvre). Nous supposons (i) qu'en réduisant le contraste du véhicule lièvre ou en masquant sa silhouette, le brouillard rend la perception du mouvement relatif plus difficile et (ii) que les conducteurs réduisent leur intervalle de façon à maintenir le seuil de perception du mouvement relatif au même niveau qu'en condition de visibilité normale. Au cours de deux expérimentations, nous avons mesuré le seuil de perception du mouvement relatif sous la forme d'un temps de réponse. Les résultats confirment le volet perceptif de notre hypothèse et montrent plus particulièrement que la sensibilité au mouvement relatif est largement dégradée lorsque les informations fournies par la silhouette du véhicule lièvre ne sont pas disponibles. Afin de tester le second volet de notre hypothèse portant sur les mécanismes du contrôle de l'intervalle, nous avons mené une expérience de suivi de véhicule où la tâche de contrôle de l'intervalle était rendue difficile par les variations de vitesse du véhicule lièvre. Les participants ont adopté différentes stratégies, dont l'une visant à se rapprocher du véhicule lièvre de façon à voir correctement sa silhouette et à augmenter ainsi la sensibilité au mouvement relatif, ce qui confirme le second volet de notre hypothèse.

Pour finir, nous avons cherché à savoir si les exigences liées à la tâche de contrôle de la trajectoire sont en cause dans l'adoption d'intervalles courts par temps de brouillard. La littérature laisse en effet supposer que le suivi d'un véhicule lièvre de près facilite le contrôle de trajectoire en condition de brouillard, tout en évitant les erreurs de positionnement latéral. L'expérience de suivi de véhicule que nous avons menée, où les exigences du contrôle de directionnel étaient importantes, n'a pas confirmé cette hypothèse. Il n'est en effet apparu aucun bénéfice perceptivo-moteur à suivre le véhicule lièvre de près en condition de brouillard. Nous constatons néanmoins que le véhicule lièvre est utilisé comme guide en condition de brouillard.

L'ensemble des résultats suggère que l'adaptation des conducteurs face à la réduction de la sensibilité au mouvement relatif due au brouillard contribue à la diminution des intervalles par temps de brouillard. Nous proposons des perspectives d'applications basées sur cette interprétation.

Mots clés : Brouillard Suivi de véhicule
Distance intervéhiculaire Temps intervéhiculaire
Perception de la distance intervéhiculaire Perception du mouvement relatif
Contrôle de l'intervalle Contrôle de la trajectoire