



IFSTTAR

INSTITUT FRANÇAIS
DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIES
DES TRANSPORTS,
DE L'AMÉNAGEMENT
ET DES RÉSEAUX

PROFIL+

Effet du profil en travers de la route sur les comportements de conduite en virage

Rapport final

CoSys / LEPSiS

Lobjois Régis, CR1

Téléphone : 33 (0)1 81 66 83 46

regis.lobjois@ifsttar.fr

Date : 21/02/2020

Auteurs :

Sami Mecheri, COSYS, LEPSIS, IFSTTAR

Franck Mars, LS2N, CNRS

Régis Lobjois, COSYS, LEPSIS, IFSTTAR

Relecteurs :

Relecture croisée

Nomenclature d'activité :

RP2-J18055

Référence sur Numéro de contrat* :

Convention DSR-IFSTTAR-CNRS n° 2201141611

Confidentialité :

NON

Rév 23/03/17

Groupe de travail (*par ordre alphabétique*)

- Stéphane Caro – IFSTTAR / Cosys – LEPSiS
- Franck Mars – CNRS – LS2N
- Sami Mecheri – IFSTTAR / Cosys – LEPSiS
- Régis Lobjois – IFSTTAR / Cosys – LEPSiS
- Fabrice Vienne – IFSTTAR / Cosys – LEPSiS

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR)

Département Composants et SYStèmes

Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulation

14-20 Boulevard Newton

Cité Descartes, Champs sur Marne

77447 Marne la Vallée Cedex 2

Tél. : 01 81 66 80 00

Fax : 01 81 66 80 01

Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)

Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N)

Université de Nantes – Faculté des Sciences et Techniques

Bâtiment 34

2 Chemin de la Houssinière

BP 92208, 44322 Nantes Cedex 3

Mots-clés :

Profil en travers de la route

Bande dérasée et multifonctionnelle

Virage

Cycliste

Comportement de conduite

Position latérale

Simulateur de conduite

Résumé des travaux

Le projet de recherche PROFIL+ (2018-2019), financé par la Délégation à la Sécurité Routière, a impliqué l'IFSTTAR-LEPSIS (coord.) et le CNRS-LS2N. L'objectif de ce projet était de renseigner de manière fine et contrôlée, au moyen d'un simulateur de conduite, les adaptations comportementales mises en œuvre par les conducteurs dans les virages face à différentes configurations de profil en travers sur des routes bidirectionnelles. A cette fin, cinq études ont été réalisées.

La première visait à mieux connaître les limites des simulateurs bas coût et intermédiaire lorsque leur utilisation est destinée à appréhender les adaptations comportementales des conducteurs aux contraintes spatiales latérales. Elle a consisté en une comparaison du comportement de conduite dans : (i) un simulateur bas coût dépourvu de cabine représentant le gabarit du véhicule, (ii) un simulateur bas coût avec une cabine complète (virtuelle) représentant le gabarit du véhicule, et (iii) un simulateur intermédiaire équipé d'une cabine partielle (physique) ne représentant pas le gabarit réel du véhicule. Dans les virages à gauche, les résultats ont montré une déviation latérale maximale similaire entre les trois simulateurs, mais les participants dans les virages à droite ont adopté une position significativement plus proche du bord intérieur de la route dans les simulateurs sans cabine et avec cabine partielle. Il a aussi été montré que les stratégies de positionnement latéral adoptées dans le simulateur sans cabine ont entraîné une augmentation significative du temps passé en dehors de la route dans les virages à droite. Ces résultats suggèrent donc que les participants appréhendent mal (sous-estiment) la distance les séparant du bord droit de leur véhicule dans les deux simulateurs qui n'offrent pas de représentation fidèle du gabarit du véhicule, en particulier en l'absence de cabine. Ainsi, les autres études du projet ont été réalisées avec un simulateur bas coût affichant une cabine complète virtuelle dans l'environnement de simulation.

La deuxième étude a porté sur l'influence de la bande dérasée sur le contrôle latéral dans les virages, en l'absence et en présence de trafic dans la voie opposée. Dans ce but, six configurations de profil en travers – issues de la combinaison de 2 largeurs de voie (3,50 et 2,75 m) et de 3 largeurs de bande dérasée (0, 0,75 et 1,25 m) – ont été testées. Le contrôle latéral a été examiné au travers de différentes mesures de position latérale (i.e., distance séparant le centre du véhicule du centre de la voie) avant et dans le virage. La présence et la largeur de la bande dérasée n'ont pas affecté les vitesses pratiquées, mais ont modifié de façon significative les stratégies de positionnement latéral dans les deux conditions de trafic. A l'approche des virages à gauche (mais pas à droite), les participants ont augmenté significativement leur déviation latérale vers le bord extérieur de la voie en présence d'une bande dérasée. A l'intérieur des virages à droite (mais pas à gauche), les participants ont augmenté significativement leur déviation latérale vers le bord intérieur de la voie en présence d'une bande dérasée. Ensembles, ces résultats montrent que les participants ont adopté, sous l'effet de la présence d'une bande dérasée, une plus grande déviation latérale aux moments où la négociation du virage nécessitait de se déplacer vers la droite (i.e., en direction de la bande dérasée). Un autre résultat marquant de cette étude est que les participants ont adapté leur déviation latérale en fonction de la largeur de la voie dans les virages à gauche (lorsqu'ils se dirigeaient vers la ligne axiale), mais cette adaptation cessait d'être mise en œuvre dans les virages à droite (lorsqu'ils se dirigeaient vers la bande dérasée), car ils ont « coupé » le virage de manière aussi prononcée dans la voie de 2.75 m que dans la voie de 3.50 m. Bien que ce comportement a été observé seulement en absence de trafic, il indique que les participants sont enclins à s'affranchir des contraintes spatiales imposées par la largeur de voie lorsqu'une zone de récupération leur est fournie. Au total, il ressort de cette étude que la présence d'une bande dérasée a une influence majeure sur le contrôle latéral qui est porteuse d'effets négatifs dans les virages à droite (augmentation du temps passé en dehors de la voie).

Les résultats de la deuxième étude ayant ouvert des perspectives qu'il convenait de poursuivre pour comprendre la cause de l'influence de la bande dérasée, la troisième étude a été menée pour tester l'hypothèse selon laquelle les trajectoires observées dans les virages à droite en présence d'une bande dérasée ont pour origine une modification de la direction de regard des conducteurs.

L'analyse a ainsi porté sur les processus visuo-locomoteurs sous-jacents au contrôle de la trajectoire, en mesurant le positionnement latéral dans la voie et les stratégies visuelles des participants à l'aide d'un oculomètre dans les virages à droite. Les directions de regard dans le virage ont été exprimées en déviation angulaire horizontale en référence au point tangent de la courbe (ou point de corde). Au plan locomoteur, une réplication des résultats de l'étude 2 a été obtenue, puisque les positions latérales étaient significativement plus proches du bord intérieur de la voie en présence d'une bande dérasée. Au plan des stratégies visuelles, il est apparu une plus grande proportion de points de regard situés à droite de la position du point tangent en présence d'une bande dérasée. Conjointement, ces données indiquent que la présence d'une bande dérasée influence la direction du regard dans les virages à droite avec des fixations ayant une plus grande excentricité horizontale vers la droite, qui sont au service des trajectoires locomotrices elles-mêmes plus excentrées. Les conclusions de cette étude sont cruciales au sens où elles suggèrent que les comportements observés en présence d'une bande dérasée dans les virages à droite ne tiennent pas à des processus cognitifs symboliques rendant compte d'une intention consciente d'adopter de telles trajectoires, mais plutôt à une altération des processus sensori-moteurs sub-symboliques qui ne font pas l'objet d'un contrôle conscient.

Suite à ces résultats, la quatrième étude a été centrée sur la capacité du type d'implantation du marquage de rive à influencer le positionnement latéral en virage, dans le but de recentrer les conducteurs sur leur voie lorsqu'ils négocient des virages à droite en présence d'une bande dérasée. Quatre types d'implantation du marquage de rive ont été retenus : une condition contrôle (ligne discontinue de type T2 présentant un intervalle de 3.50 m entre les marquages), une condition dégradée (ligne discontinue avec un intervalle de 9.20 m), une condition augmentée (ligne discontinue avec un intervalle de 1.33 m) et une condition avec une ligne continue. De premières analyses n'ont pas montré de différences significatives de positionnement dans la voie et de direction du regard entre ces différentes conditions expérimentales. Ainsi, l'implantation d'un marquage de rive continu, ou discontinu avec un intervalle d'espacement resserré, ne semble pas permettre de rapprocher les conducteurs de la ligne axiale et ainsi réduire le risque de sorties de voie par la droite. Des analyses plus complètes doivent toutefois être menées avant de rendre un avis définitif sur cette question.

Enfin, la cinquième étude a examiné la façon dont la présence d'un cycliste circulant (ou non) sur la bande dérasée influence la négociation des virages sous l'effet de contraintes spatiales différentes exercées par la largeur de la voie (expérimentation 1) et sous l'effet de différentes configurations routières pour une même contrainte spatiale (expérimentation 2). Compte tenu des résultats de l'étude 2, les manœuvres de dépassement ont été analysées, dans ces deux expérimentations, à l'approche des virages à gauche et à l'intérieur (au milieu) des virages à droite. Dans l'expérimentation 1, il a été demandé aux participants de négocier une série de virages à gauche et à droite sur deux largeurs de voie (2,75 et 3,50 m) en présence et en absence de cyclistes circulant la bande dérasée. A l'approche des virages à gauche, les participants ont adapté leur vitesse de dépassement en fonction de la largeur de voie mais pas leur effort de dégagement latéral. A l'intérieur des virages à droite, les participants n'ont pas adapté leur vitesse de dépassement en fonction de la largeur de voie mais ont utilisé l'espace supplémentaire offert par la voie la plus large pour produire un effort de dégagement latéral supérieur. Ce dernier résultat implique que la fourniture d'une plus grande largeur de voie aura une traduction directe sur la sécurité des cyclistes dépassés dans les virages à droite. Dans l'expérimentation 2, une méthode pré-post couramment utilisée pour évaluer les aménagements routiers a été appliquée, en comparant le comportement de dépassement des conducteurs sur une route contrôle (voie de 3,50 m, sans bande dérasée) et une redistribution de cette route contrôle (voie de 2,75 m, adjacente à une bande dérasée de 0,75 m). Les cyclistes étaient latéralement positionnés à 0,25 m du bord extérieur de la route sur les deux routes, permettant ainsi d'analyser le comportement de dépassement lorsque le cycliste circulait dans la voie de circulation (route contrôle) ou dans la bande dérasée (route redistribuée) avec la même contrainte spatiale pour réaliser le dépassement (3,25 m). Les participants ont transformé de façon profonde leur comporte-

ment de dépassement entre les deux routes, en adoptant une inter-distance latérale de dépassement significativement plus réduite et une vitesse significativement supérieure lorsque les cyclistes se trouvaient dans la bande dérasée. Opérée dans l'objectif de fournir un espace de circulation aux cyclistes, la redistribution du profil en travers peut donc participer à produire des interactions automobilistes-cyclistes plus risquées avec des manœuvres de dépassement moins bien préparées (moins de décélération en approche du cycliste) et moins prudentes vis-à-vis du cycliste (moins de dégagement latéral vers la gauche) lorsque le flux cycliste est mis en séparation.

Table des matières

I. Etat de l'art, problématique et objectifs du projet	10
1. Enjeux relatifs au profil en travers des routes bidirectionnelles	10
2. Profil en travers, accotements revêtus et comportements de conduite en alignement droit 11	11
3. Profil en travers, accotements revêtus et comportements de conduite en courbe.....	15
4. Objectifs et travaux réalisés	16
II. Etude 1. Effet de la présence d'une cabine de conduite partielle et complète dans un simulateur sur le contrôle latéral du véhicule	18
1. Introduction	18
2. Méthode	20
2.1. Participants.....	20
2.2. Dispositif expérimental	21
2.3. Procédure	22
2.4. Variables dépendantes et analyse statistique.....	22
3. Résultats	23
4. Discussion	25
4.1. Vitesse	25
4.2. Position Latérale.....	26
5. Conclusion	26
III. Etude 2. Analyse du contrôle latéral en virage avec et sans bande dérasée.....	28
1. Introduction	28
2. Méthode	29
2.1. Participants.....	29
2.2. Dispositif expérimental	30
2.3. Conditions expérimentales.....	30
2.4. Procédure	31
2.5. Variables dépendantes et analyse statistique.....	31
3. Résultats	32
3.1. Conduite sans trafic.....	33
3.2. Conduite avec trafic	34
4. Discussion	36
4.1. Vitesse	36
4.2. Contrôle latéral et largeur de voie	37
4.3. Contrôle latéral et largeur de bande dérasée	39
5. Conclusion	39
IV. Etude 3. Effet de la présence d'une bande dérasée en virage sur le contrôle visuo- locomoteur	41
1. Introduction.....	41
2. Méthode.....	42
2.1. Participants.....	42
2.2. Dispositif expérimental	42
2.3. Conditions expérimentales.....	43
2.4. Procédure	43
2.5. Variables dépendantes et analyse statistique.....	44
3. Résultats	45
3.1. Position latérale du véhicule	45
3.2. Déviation angulaire des points de regard.....	46
4. Discussion	47

V. Etude 4. Effet du marquage de rive sur le contrôle visuo-locomoteur en virage en présence d'une bande dérasée	49
1. Introduction.....	49
2. Méthode.....	50
2.1. Participants, dispositif et procédure expérimentale	50
2.2. Conditions expérimentales.....	50
2.3. Variables dépendantes.....	52
3. Résultats.....	52
3.1. Position latérale du véhicule	52
3.2. Déviation angulaire des points de regard.....	53
4. Conclusion	54
VI. Etude 5. Effet de la présence d'une bande dérasée sur le comportement de dépassement d'un cycliste en virage	55
1. Introduction.....	55
2. Méthode Générale.....	57
2.1. Participants.....	57
2.2. Dispositif expérimental	57
2.3. Bases visuelles 3D.....	58
2.4. Conception expérimentale	58
2.5. Procédure.....	59
2.6. Variables dépendantes.....	59
3. Expérimentation 1 – Manipulation des contraintes spatiales.....	59
3.1. Méthode.....	60
3.2. Analyse statistique	61
3.3. Résultats et discussion	61
4. Expérimentation 2 – Manipulation de la distribution du profil en travers.....	63
4.1. Méthode.....	63
4.2. Analyse statistique	64
4.3. Résultats et discussion	64
5. Discussion générale.....	66
Références bibliographiques	68

Table des illustrations

Figure 1. Positionnement latéral sur la route contrôle et sur trois redistributions du profil en travers, lorsque le conducteur est seul face à l'infrastructure (en haut) et lorsque du trafic circule dans la voie opposée (en bas).....	12
Figure 2. Illustration de situations routières présentant une contrainte spatiale identique. A gauche : deux configurations routières différentes présentant une contrainte spatiale de 325 cm. A droite : deux configurations routières différentes présentant une contrainte spatiale de 375 cm. La ligne verticale discontinue représente le niveau de contrainte spatiale (distance entre le centre de la route et le cycliste).....	14
Figure 3. Illustration du point de vue du conducteur de la configuration avec cabine (haut) et sans cabine virtuelle (bas).....	20
Figure 4. Illustration des trois simulateurs utilisés dans l'expérimentation. En haut : simulateur bas coût sans cabine (gauche) et avec cabine complète (droite). En bas : simulateur intermédiaire avec cabine partielle.....	21
Figure 5. Vitesse moyenne pratiquées par les participants dans les trois simulateurs de conduite, en fonction de la direction du virage. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.	23
Figure 6. Position latérale aux différents points de mesure dans le virage pour le simulateur sans cabine (carrés), avec cabine (triangles) et intermédiaire (cercles) dans les virages à gauche (figure de gauche) et à droite (figure de droite). Le zéro représente le centre de la voie. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.	24
Figure 7. Temps passé hors de la voie dans les trois simulateurs de conduite, en fonction de la direction du virage. Les points représentent les moyennes individuelles et les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.	25
Figure 8. Illustration des six routes expérimentales utilisées dans l'expérimentation.	31
Figure 9. Position latérale moyenne aux différents points de mesure en fonction de la largeur de la voie, de la largeur de la bande dérasée et de la direction du virage, en absence (haut) et en présence (bas) de trafic. Le zéro représente le centre de la voie. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.....	32
Figure 10. Temps passé hors de la voie en fonction de la largeur de la bande dérasée et de la direction du virage, en absence (gauche) et en présence (droite) de trafic. Les points représentent les moyennes individuelles et les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.	33
Figure 11. Illustration des six routes expérimentales, correspondant à deux largeurs de voie (2.75 et 3.50 m) et trois largeurs de bande dérasée (0, 0.75 et 1.25 m).....	43
Figure 12. Illustration des catégories de déviation angulaire au point tangent utilisées pour caractériser le contrôle visuel des participants.....	45
Figure 13. Position latérale moyenne aux différents points de mesure en fonction de la largeur de la voie et de la largeur de la bande dérasée dans les virages à droite. Le zéro représente le centre de la voie. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.	46
Figure 14. Proportion de directions de regard par catégorie de déviation angulaire au point tangent en fonction de la condition de bande dérasée dans les virages à droite.	46
Figure 15. Illustration des huit routes expérimentales, correspondant à deux largeurs de voie (2.75 et 3.50 m) et quatre marquage de rive différents.....	51

Figure 16. Position latérale moyenne aux différents points de mesure en fonction de la largeur de la voie et des caractéristiques du marquage en rive. Le zéro représente le centre de la voie. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.	53
Figure 17. Proportion des directions de regard (%) en fonction du marquage de rive et de l'amplitude de la déviation au point tangent.	53
Figure 18. Proportion des directions de regard (%) en fonction de la largeur de la voie et de l'amplitude de la déviation au point tangent.	54
Figure 19. Représentation schématique des deux routes expérimentales en absence (haut) et en présence (bas) d'un cycliste circulant sur la bande dérasée. A gauche : la route composée d'une voie de 2.75 m. A droite : la route composée d'une voie de 3.50 m.	60
Figure 20. Inter-distance latérale et vitesse de dépassement en fonction de la largeur de voie.	61
Figure 21. Différence de position latérale en fonction de la largeur de voie.	62
Figure 22. Représentation schématique de la route contrôle (gauche) et de la route distribuée (droite) avec un cycliste circulant à 0.25 m du bord extérieur de la route. Les contraintes spatiales (travel space) étaient identiques entre les deux conditions expérimentales (3.25 m).	64
Figure 23. Vitesse de dépassement (à gauche) et inter-distance latérale (à droite) en fonction de la configuration routière (cont = route contrôle, redi = route redistribuée).	65
Figure 24. Différence de position latérale dans la route contrôle et dans la route redistribuée (cont = route contrôle, redi = route redistribuée).	65

I. Etat de l'art, problématique et objectifs du projet

Le présent livrable restitue les travaux réalisés dans le cadre du projet PROFIL+, financé par la Délégation à la Sécurité Routière. Ce projet visait à renseigner la façon dont la présence et la largeur d'une bande dérasée influence les comportements de conduite en virage sur les routes bidirectionnelles de rase campagne, qui représentent un fort enjeu de sécurité.

1. Enjeux relatifs au profil en travers des routes bidirectionnelles

En 2016, la proportion des accidents mortels en France ayant eu lieu hors agglomération et hors autoroute était de 63% (ONISR, 2017). Malgré une légère baisse du nombre total de tués en 2018 (ONISR, 2018), la proportion des accidents mortels survenus hors agglomération et hors autoroute est restée stable. Au sein de ces 63%, les accidents sur routes bidirectionnelles (routes départementales et nationales à double sens de circulation sans séparateur central) ont représenté 87 % des personnes tuées (1911 personnes), soit 55 % de l'ensemble de la mortalité routière. Plus de 40 % de ces accidents sont survenus sans tiers (i.e., véhicule seul sur la route, sans piétons ni cycles) du fait d'une perte de contrôle du véhicule ayant entraîné, dans la quasi-totalité des cas (90%, voir ONISR, 2010), une collision avec un objet fixe situé en bord de chaussée ou un retournement.

Il est d'autre part reconnu que la conduite en virage, qui nécessite d'adapter le déplacement du véhicule à la courbure de la route tout en gardant une distance adéquate vis-à-vis des limites de la voie de circulation, est une tâche critique au plan de la sécurité routière puisque le taux d'accidents sur les sections courbes de la route est bien plus élevé que sur les sections droites (de 2 à 4,5 fois plus élevé, voir Charlton & de Pont, 2007 ; Glennon et al., 1985 ; Hummer et al., 2010 ; Johnston 1982 ; Leonard et al., 1994). Dans les virages également, les accidents les plus fréquents sont les accidents sans tiers – en particulier dans les zones rurales où ce type d'accident peut représenter jusqu'à 76 % des décès en virages (NCHRP, 2004) – dans lequel un véhicule quitte la voie de circulation. En Europe, 73 % des accidents mortels sans tiers se sont produits respectivement le jour (ou au crépuscule) et par temps sec (ERSO, 2018). Ces statistiques indiquent que les conducteurs sont souvent confrontés à un problème de contrôle de leur trajectoire alors même que les conditions de conduite et de visibilité ne sont pas dégradées. La question de la façon dont s'opère le contrôle latéral par rapport aux limites de la voie dans les virages sur les routes bidirectionnelles semble donc cruciale.

Une des contremesures ayant trait à l'infrastructure routière les plus régulièrement avancées pour diminuer les accidents par sortie de voie est d'installer ou d'élargir une bande dérasée adjacente aux voies de circulation (OECD, 1999; SETRA, 2002; Zeeger et al., 1990). Cette bande dérasée, aussi appelée « accotement revêtu » par les gestionnaires des réseaux routiers ou encore « bande dérasée multifonctionnelle », désigne une surlargeur adjacente à la chaussée dont les fonctions sont (i) de permettre la récupération d'une trajectoire en cas de sorties de voie et (ii) d'offrir un espace de circulation aux piétons et aux cycles (AASHTO, 2011 ; Hall et al., 1998). Selon les textes, son installation vise aussi à faciliter les dépassements des véhicules lents (Armour & McLean, 1983 ; SETRA, 2008). Dans le cas particulier de la conduite en virage, installer des accotements revêtus ou augmenter leur largeur présente l'intérêt de rendre les virages plus tolérants (Garber & Kassebaum, 2008 ; OCDE, 1999 ; SETRA, 2002 ; Zeeger et al., 1990). Dans la littérature scientifique, il a été montré de façon robuste que les routes équipées de bandes dérasées concentrent environ 30 % d'accidents en moins comparativement aux routes non équipées (Rogness et al., 1981), et ce pour un grand panel de trafics et de largeurs de bandes dérasées (Armour & McLean, 1983, Zeeger et al., 1994, Elvik et al., 2009). D'autres travaux, moins nombreux, ont aussi établi que l'efficacité des accotements est plus importante lorsqu'ils sont revêtus, car cette qualité de surface réduit la probabilité qu'un conducteur qui sort de sa voie perde le contrôle de son véhicule lorsqu'il roule sur l'accotement (Ogden, 1997). Il a ainsi été suggéré que la bande dérasée, en particulier lorsqu'elle est revêtue, constitue une solution

efficace pour réduire le nombre d'accidents par sortie de voie en autorisant les conducteurs à récupérer leurs erreurs de trajectoire.

Au plan de la conception routière, la création d'une bande dérasée est possible soit par un élargissement de la plateforme (sur les voies structurantes), soit par une redistribution du profil en travers (i.e., réduction de la largeur de voie au profit de la création d'un accotement revêtu, par le repositionnement du marquage de rive). Toutefois, en raison d'un contexte de finances publiques contraint et dans une logique de développement durable, l'installation d'une bande dérasée *via* un élargissement des plates-formes existantes n'est pas aujourd'hui favorisée. En lien avec cette politique, le département du Calvados a récemment engagé une action consistant à doter son réseau, dont le trafic ne justifie pas une augmentation de capacité, de bandes dérasées multifonctionnelles (Direction des Routes du département du Calvados, 2017). Afin d'éviter toute acquisition foncière, la condition retenue pour l'aménagement de bandes dérasées multifonctionnelles était que le projet puisse s'inscrire dans les emprises de la route. Il est ressorti de cette démarche que les aménagements n'ont pas eu d'effets négatifs sur les vitesses pratiquées, ont réduit les temps de parcours de 10% en facilitant le dépassement des véhicules lents et ont augmenté le confort des cyclistes. Ces résultats ont permis de conforter le bienfondé de la démarche engagée par ce département. Toutefois, ces résultats ne renseignent pas la façon dont les conducteurs se sont adaptés à un environnement routier composé de larges bandes dérasées – notamment du point de vue des stratégies de positionnement latéral – selon qu'il y ait ou non d'autres usagers avec qui partager la route (e.g., trafic automobile dans la voie opposée, cycliste circulant sur l'accotement).

2. Profil en travers, accotements revêtus et comportements de conduite en alignement droit

La question de l'influence des caractéristiques du profil en travers (largeur de voie et largeur de la bande dérasée) sur le comportement de conduite et la sécurité des usagers mérite donc d'être approfondie. Pour ce qui concerne les alignements droits, cette question a été traitée récemment dans le cadre du projet PROFIL, financé par la Fondation Sécurité Routière de 2014 à 2017 (Coordination : INSA-Rouen ; Partenaires : CEREMA DTer Ouest, CEREMA DTer Normandie Centre, IFSTTAR). Ce projet visait à étudier, au moyen d'un simulateur de conduite, les adaptations comportementales mises en œuvre par les conducteurs face à différentes configurations de profil en travers sur les routes bidirectionnelles de rase campagne. Deux études ont été réalisées.

Dans la première étude, la combinaison de 4 largeurs de voie (3,50, 3,25, 3,00 et 2,75 m) et de 4 largeurs de bande dérasée (0, 0,25, 0,50 et 0,75 m) a permis de tester 16 configurations différentes de profil en travers. L'effet de ces différentes configurations a été examiné alors que les conducteurs étaient soit seuls face à l'infrastructure, soit confrontés à du trafic en sens opposé. En premier lieu, l'analyse a été centrée sur les effets respectifs de la largeur de la voie et de la largeur de la bande dérasée (i.e., à profil en travers non constant). Cette première analyse trouve sa justification dans le fait que la réduction de la largeur de la voie et l'élargissement de la bande dérasée, qui opérées ensemble correspondent à une redistribution du profil en travers, ont des effets opposés sur les stratégies de positionnement des conducteurs lorsqu'elles sont opérées séparément. En effet, les travaux portant sur une réduction stricte de la largeur de la voie (i.e., sans évolution concomitante de la bande dérasée) ont montré (i) une diminution de la variabilité de la position latérale (Dijksterhuis et al., 2011 ; Godley et al., 2004 ; Green et al., 1994), expliquée par une augmentation des exigences de contrôle de la trajectoire ; (ii) une diminution de la vitesse pratiquée (Godley et al., 2004 ; Lewis-Evans & Charlton, 2006) ; (iii) une diminution de la distance au centre de la route. D'un autre côté, il a été montré que la fourniture d'un accotement revêtu (Bella, 2013) ou son élargissement (Ben-Bassat & Shinar, 2011) entraîne une augmentation des vitesses pratiquées et un repositionnement des conducteurs en direction de la rive.

Le premier niveau d'analyse réalisé sur les données de 34 participants a confirmé la baisse significative de la variabilité de la position latérale, ainsi qu'un rapprochement des participants du centre de

la route lorsqu'une réduction de la largeur de la voie est opérée. Toutefois, la position latérale (i.e., distance séparant le centre du véhicule du centre de la voie) a été affectée de façon différenciée par la réduction de la largeur de voie en fonction du trafic. En l'absence de trafic, cette réduction a impliqué un déplacement graduel de la position latérale vers le marquage de rive. En présence de trafic, les participants ont adopté une position excentrée vers le marquage de rive mais similaire pour toutes les largeurs de voie. De manière intéressante, l'application d'une bande dérasée n'a pas affecté la variabilité de la position latérale (ou stabilité de la conduite) – ce qui suggère que cet élément du profil en travers n'a pas été considéré comme un espace roulable – mais a eu pour effet de rapprocher les participants du marquage de rive lorsque sa largeur était supérieure ou égale à 0,50 m.

En second lieu, l'analyse a porté sur la redistribution du profil en travers le plus courant sur routes bidirectionnelles en France (7,30 m, soit deux voies de 3,50 m chacune délimitées par un marquage de rive de 0,15 m ; noté [3,50, 0] ci-après). Trois modalités de redistribution de cette route contrôle ont été testées (Figure 1) : [3,25, 0,25], [3,00, 0,50] et [2,75, 0,75]. Si la vitesse pratiquée n'a pas été affectée par les redistributions opérées, les résultats ont montré, en comparaison de la route contrôle, une meilleure stabilité de la conduite (i.e., moins de variabilité de la position latérale) ainsi que des positions latérales plus éloignées du bord de la route dans les redistributions [3,00, 0,50] et [2,75, 0,75]. Il est donc ressorti que la redistribution d'un profil en travers de 7,30 m transforme le comportement de conduite pour plus de sécurité (meilleure stabilité et plus grande distance au bord de la route), tout en permettant, à bas coût, de fournir une zone de récupération aux usagers. La redistribution [3,00, 0,50] a été particulièrement recommandée dans la mesure où les participants se tenaient à une distance de 49 cm du marquage de rive et répartissaient de façon équivalente la surface de la route à gauche (91 cm) et à droite (99 cm) du véhicule¹.

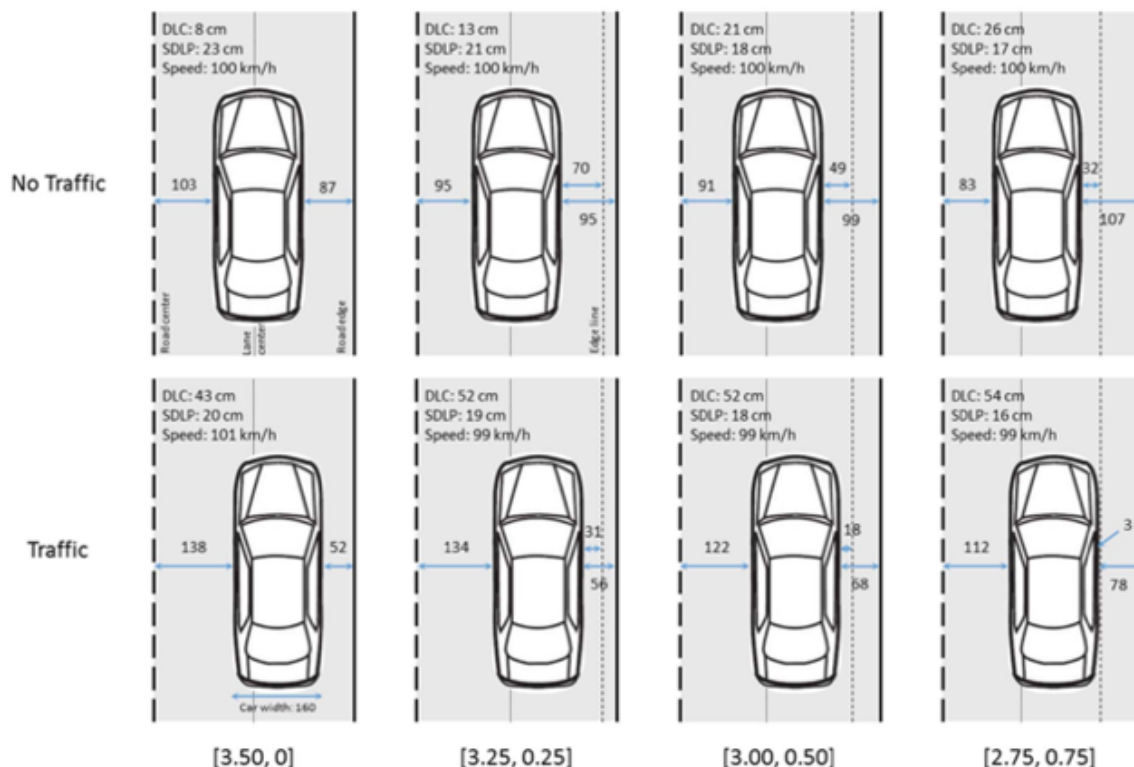


Figure 1. Positionnement latéral sur la route contrôle et sur trois redistributions du profil en travers, lorsque le conducteur est seul face à l'infrastructure (en haut) et lorsque du trafic circule dans la voie opposée (en bas).

¹ Pour une discussion approfondie de ces résultats, le lecteur pourra se référer à la publication suivante : Mecheri, S., Rosey, F., & Lobjois, R. (2017). The effects of lane width, shoulder width, and road cross-sectional reallocation on drivers' behavioral adaptations. *Accident Analysis & Prevention*, 104, 65–73.

La seconde étude du projet PROFIL a caractérisé les effets induits par l'implantation d'une bande dérasée multifonctionnelle sur le comportement de conduite, dont une des fonctions est de permettre la circulation d'autres usagers non motorisés tels que les cyclistes (SETRA, 2008). Le focus a été placé ici sur les effets du profil en travers sur l'interaction, au moment du dépassement, entre un automobiliste et un cycliste (virtuel) pour deux raisons. Premièrement, la pratique cycliste a fortement augmenté au cours des deux dernières décennies (Pucher et al., 2011), ce qui accroît, de fait, le nombre d'interactions automobiliste-cycliste sur le réseau routier. Deuxièmement, les données accidentologiques soulignent le risque de la circulation à vélo, les cyclistes étant 12 fois plus tués que les automobilistes par kilomètre roulé (Pucher & Dijkstra, 2003). Etant donné que les cyclistes sont largement plus accidentés de l'arrière que de l'avant (voir Stone & Broughton, 2003), la situation de dépassement au sein de l'interaction automobiliste-cycliste semble particulièrement cruciale. En effet, lorsqu'une action de dépassement est engagée, le risque pour le cycliste est d'être heurté ou d'être dépassé de trop près ce qui peut l'amener à perdre le contrôle de sa trajectoire. Le risque pour l'automobiliste est de heurter le cycliste ou de se déplacer vers la voie opposée et s'exposer ainsi à une collision avec un véhicule y circulant. Ces quelques éléments témoignent de la nécessité de mieux appréhender l'interaction automobiliste-cycliste – avec une focalisation sur la situation de dépassement – dans le contexte de l'implantation d'une bande dérasée qui consiste en une mise en séparation des flux automobilistes et cyclistes sans séparation physique.

Trois facteurs identifiés dans la littérature comme structurant l'interaction automobiliste-cycliste en situation de dépassement ont été manipulés (Harkey & Stewart, 1997 ; Love et al., 2012 ; Parkin & Meyers, 2010 ; Shackel & Parkin 2014 ; Walker, 2007). Premièrement, la largeur de la bande dérasée multifonctionnelle (bande ou piste cyclable, dans les travaux précités) implantée en vue de permettre la circulation des cyclistes a été manipulée. Les largeurs retenues ont été centrées autour de la largeur recommandée sur les routes bidirectionnelles (1,25 m, voir DSCR, 1995), en y associant une valeur plus basse (0,75 m, soit la largeur minimum autorisée) ainsi qu'une valeur plus haute (1,75 m). Deuxièmement, étant donné que le rôle de la largeur de la bande dérasée multifonctionnelle ne peut être pleinement appréhendé en détachant cette largeur de son contexte – c'est-à-dire de la largeur de la voie à laquelle elle est accolée – deux largeurs de voie (3,00 et 3,50 m) ont été utilisées dans l'analyse. Troisièmement, la position latérale du cycliste a été manipulée de façon à pouvoir tester l'effet de plusieurs situations de conduite. Ainsi, les participants ont été confrontés à des cyclistes roulant dans leur voie de circulation (0,25 m à gauche du marquage de rive) et dans la bande dérasée multifonctionnelle (0,25 et 0,75 m à droite du marquage de rive). Les analyses ont porté sur la façon dont la largeur de la bande dérasée, lorsqu'elle est seule manipulée, et la situation routière, qui émane de la combinaison entre largeur de la voie, largeur de bande dérasée et position du cycliste, affectent les manœuvres de dépassement dans des situations présentant des contraintes spatiales identiques (i.e., même distance entre le centre de la route et le cycliste ; voir Figure 2).

Les résultats ont montré que la largeur de la bande dérasée multifonctionnelle n'a aucunement modifié la vitesse et l'inter-distance latérale de dépassement pour une largeur de voie donnée – qu'elle soit large ou non (3,00 ou 3,50 m) – et pour une position du cycliste donnée – qu'elle soit située dans la bande dérasée multifonctionnelle ou non (-0,25, 0,25 ou 0,75 m). Du point de vue de la manipulation de la configuration routière, l'analyse a été centrée autour de deux niveaux de contrainte spatiale : (i) 325 cm (une voie de 3,00 m avec un cycliste positionné à 0,25 m et une voie de 3,50 m avec un cycliste positionné à -0,25 m), et (ii) 375 cm (une voie de 3,00 m avec un cycliste positionné à 0,75 m et une voie de 3,50 m avec un cycliste positionné à 0,25 m).

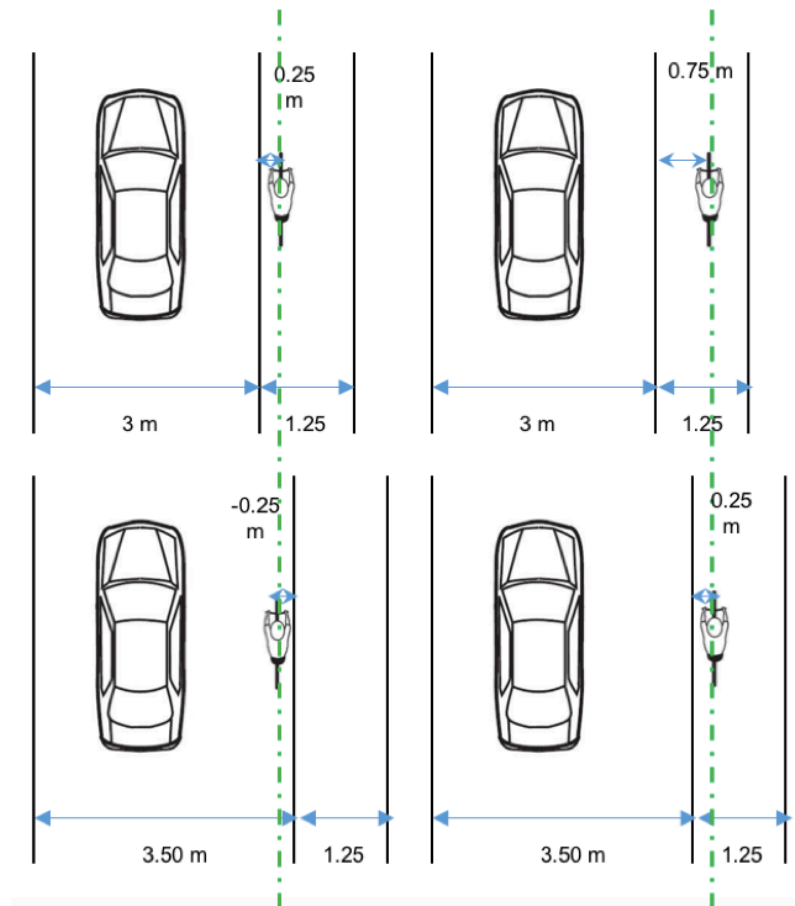


Figure 2. Illustration de situations routières présentant une contrainte spatiale identique. A gauche : deux configurations routières différentes présentant une contrainte spatiale de 325 cm. A droite : deux configurations routières différentes présentant une contrainte spatiale de 375 cm. La ligne verticale discontinue représente le niveau de contrainte spatiale (distance entre le centre de la route et le cycliste).

Pour la contrainte spatiale de 325 cm, les participants ont adopté une inter-distance latérale significativement plus importante et une vitesse significativement inférieure lorsque les cyclistes se trouvaient dans leur voie de circulation en comparaison des situations dans lesquelles ils se trouvaient dans la bande dérasée. Pour la contrainte spatiale de 375 cm, les résultats ont montré que les effets d'une redistribution de l'espace dépendaient du profil en travers de la route. Pour le profil le plus large (9.50 m), la manipulation de la configuration routière n'a pas été accompagnée de modifications du comportement de dépassement. Au plan applicatif, ce résultat est important dans la mesure où il montre qu'une manipulation de la configuration routière similaire à celle engagée lors d'une redistribution du profil en travers n'introduit pas d'effets délétères sur l'interaction automobiliste-cycliste. A l'opposé, une redistribution de l'espace roulant sur un profil en travers de 8.50 m n'entraîne pas de changement au plan de la vitesse au moment du dépassement mais une réduction de la distance séparant le véhicule et le cycliste. Cette étude a ainsi mis en avant des éléments favorables à l'aménagement de bandes dérasées multifonctionnelles sur les sections droites en vue de permettre la circulation des cyclistes pour les larges profils en travers².

² Pour une discussion approfondie de ces résultats et de leurs implications pour la conception routière, le lecteur pourra se référer à la publication suivante : Mecheri, S., Rosey, F., & Lobjois, R. (2020). Manipulating constraints on driver-cyclist interactions in a fixed travel space: Effects of road configuration on drivers' overtaking behavior. *Safety Science*, 123, 1–11.

3. Profil en travers, accotements revêtus et comportements de conduite en courbe

Bien que la présence et la largeur de la bande dérasée sont des facteurs basiques dans les recherches accidentologiques (e.g., Hadi et al., 1995 ; Karlaftis & Golias, 2002), les études ayant examiné les effets de ces deux facteurs sur le comportement de conduite dans les virages sont rares (Bella, 2013 ; Ben-Bassat & Shinar, 2011 ; voir également Abele & Møller, 2011). Les études existantes ont examiné les effets de la largeur de la bande dérasée (0,50, 1,20 m et 3 m ; Ben-Bassat & Shinar, 2011) ou de la présence d'une bande dérasée (absence vs. présence d'une bande dérasée de 0,50 m ; Bella, 2013) en fonction de la configuration du bord de la chaussée (présence ou absence d'une glissière de sécurité) et de la géométrie de la route (section droite, virage à gauche peu serré, virage à gauche serré, virage à droite peu serré, virage à droite serré). Il a été montré que les participants adoptent des vitesses plus élevées en présence d'une bande dérasée (Bella, 2013) et lorsque la bande dérasée est plus large mais uniquement en présence d'une glissière de sécurité (Ben-Bassat & Shinar, 2011). Concernant les stratégies de positionnement latéral, Ben-Bassat et Shinar (2011) ont montré que les participants conduisaient près du côté gauche de la voie lorsque la bande dérasée était étroite (0,50 m), mais se déplaçaient vers le milieu de la voie et vers le côté droit de la voie lorsque la largeur de la bande dérasée augmentait (1,20 et 3,00 m, respectivement). Cet effet de la largeur de la bande dérasée sur la position latérale du conducteur était renforcé en présence d'une glissière de sécurité, mais n'a pas été affecté par la géométrie de la route. Ces résultats ont été confirmés par Bella (2013), qui a montré que la présence d'un accotement de 0,50 m produisait une position plus éloignée de 0,20 m du centre de la route, quelle que fut la configuration du bord de la chaussée et la géométrie de la route.

Bien qu'ils convergent, les résultats de ces deux études sont quelque peu étonnants dans la mesure où ils démontrent des effets importants de la présence de la bande dérasée sur la façon dont les conducteurs utilisent l'espace de leur voie pour négocier les virages, mais indiquent également que ces effets ne sont pas modulés par la direction du virage. Cette observation est surprenante car l'espace supplémentaire fourni par une bande dérasée ne modifie pas les contraintes induites par le fait de produire une trajectoire courbe de la même manière dans les virages à gauche et à droite. En effet, selon le modèle de négociation des virages de de Boer (1996), les conducteurs se dirigent vers la limite extérieure de la voie à l'approche de la courbe, s'engagent dans la courbe avant l'entrée dans le virage et se déplacent vers le bord intérieur de la voie autour de l'apex (i.e., milieu du virage). Ce comportement qui consiste à se déplacer du bord extérieur de la voie vers une position proche du bord intérieur de la voie autour de l'apex a été observé dans de nombreuses études (Mars, 2008 ; Robertshaw & Wilkie, 2008), et est communément désigné comme l'action de "couper le virage". Couper le virage permet aux conducteurs d'aplanir leur trajectoire (i.e., de réduire sa courbure) dans les virages et de potentiellement les négocier à une plus grande vitesse. Sur les routes bidirectionnelles, étant donné que la bande dérasée adjacente à la voie de circulation est située à sa droite quelle que soit la direction de la courbe, on peut imaginer que sa présence induise une plus grande déviation vers le bord intérieur de la voie dans les virages à droite afin d'aplanir leur trajectoire car ils bénéficient d'un espace supplémentaire au-delà du marquage de rive. En revanche, dans les virages à gauche, il est plus difficile d'imaginer que les conducteurs se déplacent davantage vers l'intérieur de la courbe en présence d'une bande dérasée (et se placer ainsi plus proche du trafic venant en sens inverse), puisque sa présence n'implique pas d'espace supplémentaire au-delà du marquage central. Par conséquent, au plan logique, une hypothèse qui pourrait être formulée serait que la présence d'une bande dérasée influence la négociation des virages de manière distincte en fonction de leur direction, en contribuant à renforcer la stratégie consistant à couper les virages uniquement à droite.

De manière intéressante, un examen approfondi des données de position latérale publiées dans la littérature antérieure révèle un certain degré de cohérence avec cette hypothèse. Dans l'étude de Bella (2013), la présence de bandes dérasées a provoqué une nette augmentation de la déviation du

centre de la voie vers le bord intérieur de la voie dans les virages à droite serrés (31 cm et 70 cm dans les conditions sans et avec bande dérasée), alors que la différence de déviation entre ces deux conditions n'était que de 5 cm dans les virages à gauche serrés. De même, dans l'étude de Ben-Bassat et Shinar (2011), la déviation latérale vers le bord intérieur de la voie était similaire dans les virages à gauche peu serrés (32, 43 et 43 cm en présence d'accotement de 0,50, 1,20 et 3,00 m), alors qu'elle augmentait substantiellement avec la largeur de la bande dérasée dans les virages à droite peu serrés (35, 53 et 70 cm). Ainsi, lorsque l'on resserre l'analyse sur seulement quelques caractéristiques géométriques de la route, il apparaît que la présence et l'élargissement d'une bande dérasée ont donné lieu à une plus grande déviation latérale vers le bord intérieur du virage dans les virages à droite uniquement. Il semble donc plausible que l'absence de différences statistiquement significatives dans les études antérieures puisse davantage tenir d'un plan factoriel spécifique (i.e., un facteur de géométrie routière intégrant à la fois la direction des virages, leur rayon de courbure et les sections droites) que d'une véritable absence d'interaction entre les effets produits par la bande dérasée et la direction de la courbe. Une autre limite des études antérieures repose sur le fait qu'elles ont caractérisé le comportement à partir d'une déviation latérale moyenne pour l'ensemble de la courbe. En procédant ainsi, elles n'ont pas capturé la variation de la déviation latérale tout au long du virage, et n'ont pas non plus rendu compte de cette déviation à l'approche de la courbe. Par conséquent, s'il est bien établi que les bandes dérasées revêtues sont associées à une réduction statistiquement significative de la fréquence des accidents par sorties de voie sur les routes rurales bidirectionnelles (Zeeger & Council, 1995 ; Ogden, 1997), ses effets sur les stratégies de positionnement latéral ne sont que partiellement connus et méritent d'être étudiés de manière plus rigoureuse en relation avec la direction du virage, et ce à double titre. Premièrement, parce que l'état des connaissances actuelles ne permet pas de déterminer si les conducteurs sont affectés de la même manière ou non par la présence d'une bande dérasée dans les virages à gauche et à droite. Deuxièmement, parce que le renforcement des comportements consistant à couper les virages à droite en présence d'une bande dérasée, s'il existe, peut exposer les conducteurs à un plus grand nombre d'erreurs de trajectoire et produire des effets délétères sur la sécurité des cyclistes circulant sur l'accotement.

4. Objectifs et travaux réalisés

Partant de ces considérations, le projet de recherche PROFIL+ s'est donné pour objectif de documenter les effets comportementaux induits par l'aménagement de bandes dérasées dans la tâche de négociation des virages sur les routes bidirectionnelles de rase campagne. Pour étudier finement l'influence des caractéristiques du profil en travers (largeur de la bande dérasée et de la voie qui lui est adjacente) et de la situation de conduite (absence ou présence de trafic) sur les processus de contrôle latéral, il a été décidé de recourir à l'expérimentation sur simulateur de conduite qui en plus de permettre de contrôler ces facteurs n'engage aucun risque pour les participants. Cinq études ont visé à renseigner les adaptations comportementales mises en œuvre dans les virages face à différentes configurations de profil en travers sur les routes bidirectionnelles.

La première a abordé la question de la validité d'un simulateur de conduite à bas coût dépourvu de cabine et d'un simulateur de conduite intermédiaire doté d'une cabine partielle pour l'appréhension des contraintes spatiales latérales. La deuxième a porté sur les effets induits par différentes configurations routières – issues de la combinaison entre deux largeurs de voie et trois largeurs de bande dérasée – sur les vitesses pratiquées et les stratégies de positionnement latéral dans les virages. Les résultats de cette deuxième étude ayant ouvert des perspectives explicatives qu'il convenait de poursuivre pour comprendre la cause de la modification du contrôle de trajectoire dans les virages en présence de bande dérasée, deux études supplémentaires (études 3 et 4) – non contractualisées dans la convention de recherche – ont été réalisées. Pour leur réalisation, l'IFSTTAR a mis à disposition de l'équipe-projet un dispositif d'enregistrement et d'analyse des mouvements oculaires. Ainsi, la troisième étude a visé à tester l'hypothèse selon laquelle les trajectoires locomotrices observées

sous l'effet de la présence d'une bande dérasée dans les virages à droite ont pour origine une altération de la stratégie visuelle sous-jacente à la planification et au contrôle de la trajectoire. La quatrième étude a évalué la capacité du type d'implantation du marquage de rive (en manipulant le rapport vide/plein des lignes de rive) à influencer la direction du regard dans les virages à droite dans l'objectif de limiter les effets négatifs liés à l'aménagement d'une bande dérasée sur les trajectoires. Enfin, la cinquième étude a examiné la façon dont la présence d'un cycliste circulant (ou non) sur la bande dérasée influence le comportement de conduite dans les virages en fonction des contraintes spatiales exercées par la largeur de la voie sur la manœuvre de dépassement.

II. Etude 1. Effet de la présence d'une cabine de conduite partielle et complète dans un simulateur sur le contrôle latéral du véhicule

1. Introduction

Les simulateurs de conduite sont régulièrement utilisés dans les domaines de la formation et de la recherche comportementale (Caird & Horrey, 2011). Si d'aucuns considèrent que les véhicules instrumentés sur routes réelles représentent le meilleur dispositif pour étudier le comportement de conduite, le simulateur est l'outil le plus utilisé dans la recherche comportementale, principalement parce qu'il permet de contrôler tous les facteurs situationnels sans engager de risque pour le participant (Carsten & Jamson, 2011). Les simulateurs de conduite sont généralement classés en trois grandes catégories : les simulateurs à bas coût (volant et pédales issus des jeux vidéo, écran d'ordinateur, pas de cabine), intermédiaire (projection large, base fixe et cabine de véhicule partielle ou complète) et de haut niveau (projection à 360° et cabine complète montée sur une base mobile ; voir Blana, 1996; Jamson, 2011). Les simulateurs de ces trois catégories diffèrent dans leur capacité à recréer les stimuli disponibles dans les situations réelles (Stoffregen, Bardy, Smart, & Pagulayan, 2003), ce qui rend difficile la sélection du simulateur le plus approprié pour l'étude d'une tâche de conduite donnée. La présente étude porte sur la fiabilité des mesures de contrôle latéral obtenues avec différents simulateurs de conduite, en particulier les simulateurs à bas coût sans cabine (qui ne fournissent pas d'informations quant aux dimensions du véhicule) et les simulateurs intermédiaires équipés de cabines partielles (qui ne représentent pas les dimensions réelles du véhicule).

La question de la fiabilité des résultats obtenus avec les simulateurs de conduite représente une préoccupation chez les chercheurs depuis déjà plusieurs décennies (De Waard, Van der Hulst, Hoedemaeker, & Brookhuis, 1999; Farber, 1999), qui a donné lieu à différentes études de validation en référence au comportement de conduite en situation réelle (e.g., Carter & Laya, 1998; Reed & Green, 1999). Certaines études ont démontré la validité relative de certains simulateurs en montrant une convergence entre les données comportementales issues des simulateurs et celles issues d'une situation réelle (e.g., Bella, 2008; Yan Abdel-Aty, Radwan, Wang & Chilikapti, 2008; Godley, Triggs & Fildes, 2002). Cette démarche de comparaison a principalement été utilisée pour évaluer la distraction du conducteur découlant de l'interaction avec un système d'information embarqué (tâche secondaire) (Burnett, Irune & Mowforth, 2007; Jamson & Jamson, 2010; Klüver, Herrigel, Heinrich, Schöner & Hecht, 2016; Santos, Merat, Mouta, Brookhuis & de Waard, 2005). Les résultats ont montré que les mesures de conduite (variabilité de la vitesse et de la position latérale) étaient affectées de façon similaire par l'interaction avec la tâche secondaire dans les simulateurs à bas coût (sans cabine) et dans les simulateurs de gammes supérieures (avec cabine complète). Bien que les mesures de conduite n'ont été sensibles aux différents niveaux de difficulté de la tâche secondaire uniquement dans les simulateurs intermédiaires (et non dans les simulateurs bas coût, voir Jamson & Jamson, 2010; Santos et al., 2005), il a été conclu que les simulateurs bas coût constituent un outil fiable pour étudier les effets d'un système IVIS sur le comportement de conduite.

Bien que ce corpus d'études fournit des éléments qui attestent de la fiabilité des données obtenues avec simulateurs bas coût, ceux-ci sont restreints à un domaine très spécifique du comportement de conduite (i.e., la distraction). Par ailleurs, au-delà de la façon dont différentes mesures de conduite peuvent être affectées par l'accomplissement d'une tâche secondaire, ces études ont également montré une plus grande variabilité de la position latérale du véhicule et une plus grande quantité d'actions de correction au volant sur les simulateurs à bas coût que sur les simulateurs de plus haut niveau (Jamson & Jamson, 2010; Klüver et al., 2016; Rosey & Auberlet, 2014). Il a été proposé que le retour d'effort au volant, généralement pauvre sur les dispositifs à bas coût, pouvait être la cause de ces différences (Jamson & Jamson, 2010; Park, Allen, Rosenthal, & Fiorentino, 2005). Mais les données issues d'expérimentations contrôlées sur cette question n'ont toutefois pas été concluantes (voir Liu & Chang, 1995; Mourant & Sadhu, 2002). Un autre facteur explicatif potentiel est le champ

visuel horizontal (généralement inférieur sur les simulateur à bas coût), dont l'incidence sur le contrôle latéral des conducteurs a parfois été mise en lumière dans la littérature (Jamson, 2000, 2001; Kappé, van Erp & Korteling, 1999; mais voir Chatziastros, Wallis & Bühlhoff, 1999). Cependant, le nombre de facteurs confondants inhérents aux études de comparaison de simulateurs rend difficile l'appréhension de l'effet propre du champ visuel sur le contrôle latéral. Un facteur qui n'a été que rarement étudié pour expliquer les différences de contrôle latéral entre les simulateurs de différents niveaux est la présence ou l'absence d'une cabine représentant le gabarit du véhicule dans l'environnement du conducteur. La faible quantité de travaux sur cette question est surprenante au plan théorique, dans la mesure où le contrôle latéral du véhicule est intimement lié à ses dimensions. En effet, il est bien établi que les individus contrôlent leurs activités locomotrices en déterminant si des ajustements locomoteurs – qui permettent une locomotion adaptative (Warren & Fajen, 2004) – sont nécessaires. Il a aussi été montré que les ajustements locomoteurs sont fondés sur des jugements perceptifs des propriétés environnementales qui intègrent les caractéristiques du système de locomotion (Franchak, Celano & Adolph, 2012; Higuchi, Cinelli, Greig & Patla, 2006). Comme l'ont démontré Warren et Whang (1987), le recours à une rotation des épaules dans une tâche de franchissement de porte (dont la largeur est manipulée) dépend du ratio entre la largeur de l'ouverture et la largeur des épaules du participant, et non de la largeur absolue de l'ouverture. En locomotion automobile, il a été montré que les conducteurs passent d'un mode de conduite négligeant l'erreur de trajectoire à un mode de conduite compensant l'erreur de trajectoire en fonction du temps restant jusqu'à la sortie de voie (i.e., *Time-to-line-Crossing*, Godthelp, 1988). Ces résultats suggèrent que les conducteurs ajustent leurs actions de conduite sur la base du contrôle d'une marge de sécurité. La locomotion automobile serait ainsi contrôlée en adaptant les contraintes spatiales que représente la largeur du véhicule aux contraintes spatiales que représente la largeur de la voie. L'absence de cabine dans les simulateurs à bas coût, ainsi que la présence d'une cabine partielle dans les simulateurs intermédiaires, posent donc la question de leur capacité à fournir le support informationnel permettant aux conducteurs d'intégrer les contraintes spatiales de la locomotion automobile.

A notre connaissance, seules deux études réalisées dans des conditions contrôlées ont porté sur les effets de la cabine du simulateur (présence vs absence) sur le comportement de conduite (Burnett et al. 2007 ; Mecheri & Lobjois, 2018). Burnett et al. (2007) ont comparé le comportement de conduite entre une première condition fournissant la cabine complète d'un véhicule réel, à une seconde dans laquelle la carrosserie du véhicule était retirée. Aucune différence significative n'a été constatée sur la variabilité de la position latérale du véhicule (les données de position latérale n'étaient pas rapportées). Le simulateur sans la carrosserie présentait toutefois l'ensemble du tableau de bord du véhicule, ce qui a probablement permis de spécifier la largeur du véhicule (voir Burnett et al., 2007). Plus récemment, Mecheri et Lobjois (2018) ont évalué le contrôle latéral dans un simulateur de conduite à bas coût en l'absence et en présence d'une cabine complète virtuelle (i.e., affichée dans l'environnement de simulation ; voir Figure 3).

En ligne droite, les participants ont adopté une position latérale plus éloignée du centre de la voie vers le marquage de rive dans le simulateur sans cabine. En virage, les participants ont dévié davantage du centre de la voie dans le simulateur sans cabine lorsque la stratégie locomotrice exigeait de se déplacer vers la droite. Etant connu que la stratégie naturelle de conduite dans une courbe consiste à « couper le virage³ », cette déviation a été observée à différents moments de la négociation du virage selon sa direction. Dans les virages à gauche, les participants ont ainsi davantage dévié vers l'extérieur de la voie (et donc vers la droite) dans le simulateur sans cabine au moment de l'approche. Dans les virages à droite, la position latérale à l'apex ainsi que la position

³ Lorsque les conducteurs coupent le virage, ils se décalent dans un premier temps vers l'extérieur de la voie afin de préparer leur entrée dans la courbe avant de se diriger vers l'intérieur de la voie aux environs de l'apex. L'intérêt de cette manœuvre particulière est de réduire la courbure de la trajectoire empruntée et donc les exigences au plan du contrôle du véhicule.

maximale atteinte dans la courbe étaient plus excentrées vers la droite dans le simulateur sans cabine. Dans toutes les situations de conduite (en ligne droite et en virage), les trajectoires locomotrices en l'absence de cabine se sont révélées inadaptées à la largeur de la voie, puisqu'elles ont entraîné une augmentation significative du temps passé hors de la voie en comparaison des autres conditions expérimentales.

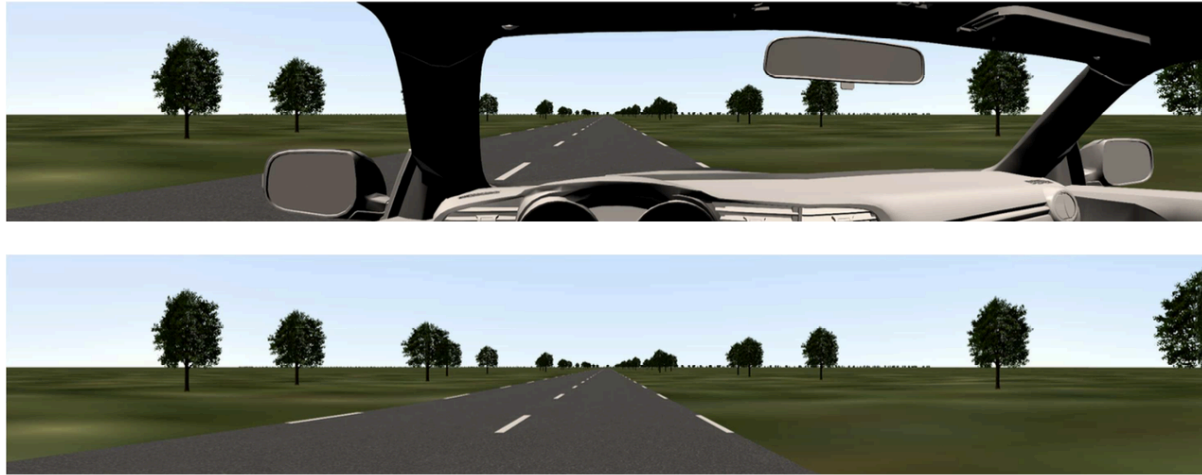


Figure 3. Illustration du point de vue du conducteur de la configuration avec cabine (haut) et sans cabine virtuelle (bas).

Les résultats de l'étude de Mecheri et Lobjois (2018) suggèrent ainsi fortement que les participants sous-estiment la distance les séparant du bord droit du véhicule (et donc la largeur du véhicule) en l'absence de cabine, et que cette sous-estimation induit des mesures de contrôle latéral non valides. Etant donné qu'aucune information ne spécifie les bords extérieurs du véhicule en l'absence de cabine, cette sous-estimation du bord droit tient certainement au fait que ce bord est distant et nécessite d'être visuellement spécifié pour être correctement estimé, au contraire du bord gauche à côté duquel le conducteur est naturellement positionné en situation de conduite réelle. La prise en compte de ces éléments mène à une autre question d'importance qui concerne la capacité des simulateurs dotés de cabines partielles – qui ne représentent pas le gabarit réel d'un véhicule – à offrir un environnement permettant aux conducteurs d'intégrer les contraintes spatiales de la locomotion automobile. Pour y répondre, le contrôle latéral de conducteurs engagés dans une tâche de négociation de virages a été comparé dans trois configurations de simulateurs : (i) un simulateur à bas coût dépourvu de cabine représentant le gabarit d'un véhicule, (ii) un simulateur à bas coût présentant une cabine complète virtuelle, affichée dans l'environnement de simulation, (iii) un simulateur intermédiaire équipé d'une cabine physique partielle, qui ne représente pas le gabarit réel d'un véhicule. Puisque la cabine partielle d'un simulateur intermédiaire ne fournit pas d'informations spécifiant les dimensions réelles du véhicule, il a été considéré que le bord distant (droit) du véhicule ne pourrait être correctement estimé dans ce type de simulateur, à l'image de ce qui a été précédemment observé en l'absence de cabine (Mecheri & Lobjois, 2018). Il était donc attendu, en l'absence de cabine et en présence d'une cabine partielle, des erreurs d'adaptation aux contraintes spatiales que représentent la largeur de la voie, en particulier lorsque la stratégie locomotrice exige de dévier latéralement vers la droite (i.e., approche des virages à gauche, apex des virages à droite).

2. Méthode

2.1. Participants

Vingt-cinq participants (13 femmes, 12 hommes ; âge moyen : 35 ± 13 ans), tous ayant une vision normale ou corrigée, ont été recrutés pour cette expérimentation qui était approuvée par le comité d'éthique local. Les participants avaient leur permis de conduire depuis au moins deux ans et avaient

au moins 20 000 km d'expérience de conduite. Tous les participants ont donné leur consentement éclairé avant d'être inclus dans l'étude et étaient naïfs quant aux hypothèses expérimentales.

2.2. Dispositif expérimental

Trois types de simulateurs ont été utilisés dans l'expérimentation (voir Figure 4) : (i) un simulateur à bas coût dépourvu de cabine représentant le gabarit du véhicule, (ii) un simulateur à bas coût en présence d'une cabine virtuelle complète, (iii) un simulateur intermédiaire équipé d'une cabine physique partielle.

Les deux premiers simulateurs ont été conçus à partir de la même plateforme (i.e., le même simulateur de conduite à bas coût), pour laquelle seule la nature de l'information visuelle qui était présentée aux participants était manipulée (absence ou présence de la cabine complète virtuelle). Ce simulateur de conduite était composé d'un volant à retour d'effort, d'un jeu de pédales et d'une boîte de vitesses (Logitech G25) montés sur un siège de voiture. L'environnement visuel était affiché sur trois écrans de 1,22 m de large et 0,70 m de haut (fréquence de rafraîchissement de 60 Hz ; résolution de 3840 × 2160 pixels). La distance entre la tête des participants et le centre de chaque écran était de 1,05 m. L'angle visuel ainsi formé par les trois écrans était de 180° horizontalement et de 37° verticalement. La configuration "cabine" présentait une cabine virtuelle complète à l'échelle 1 dans l'environnement visuel (la largeur du véhicule simulé était 1.60 m, rétroviseurs exclus). La configuration "sans cabine" ne présentait pas de cabine dans l'environnement visuel.

Le simulateur intermédiaire était composé d'un poste de conduite fournissant les organes de commande d'un véhicule réel assortis d'une ceinture de sécurité et d'un siège réglable (développé par la société ECA-FAROS). L'environnement visuel était affiché sur trois écrans de 1,22 m de large et 0,68 m de haut (fréquence de rafraîchissement de 60 Hz ; résolution de 3840 × 2160 pixels). La distance entre la tête des participants et le centre de chaque écran était de 1,05 m. Dans cette configuration, l'angle visuel formé par les trois écrans était de 180° horizontalement et de 36° verticalement.



Figure 4. Illustration des trois simulateurs utilisés dans l'expérimentation. En haut : simulateur bas coût sans cabine (gauche) et avec cabine complète (droite). En bas : simulateur intermédiaire avec cabine partielle.

Dans les trois conditions de simulateur, un ensemble de haut-parleurs ont restitué les informations du régime moteur et les bruits environnementaux pour améliorer l'expérience du conducteur. Le compteur de vitesse n'a pas été affiché (ou a été masqué avec le simulateur intermédiaire) pendant l'expérimentation afin d'éviter un contrôle de la vitesse basé sur son affichage. Ceci nous permettait d'évaluer les effets de la cabine sur la perception de la vitesse. Les données ont été recueillies à une fréquence de 60 Hz et comprenaient des informations sur le comportement du conducteur (actions sur le volant et les pédales) et la voiture simulée (position et vitesse).

La route expérimentale était une route rurale bidirectionnelle de rase campagne d'une longueur de 12,5 km. Le tracé de la route consistait en une série de 12 virages ordonnés de façon aléatoire (6 virages à gauche et 6 virages à droite), séparés par des sections droites de 750 m. Tous les virages avaient un rayon de courbure et une longueur de 200 m, mesurée à partir du centre de la route. La surface de la route était texturée et marquée par une ligne discontinue de 0,18 m de largeur sur les bords et de 0,15 m au centre. La largeur de la voie était de 3,50 m et le profil en travers de la route de 7,36 m. Le terrain environnant correspondait à un environnement rural de rase campagne contenant des arbres placés avec un écart minimum de 20 m du bord de la route. L'espacement des arbres était aléatoire, mais répété tous les 100 m afin de contrôler le nombre de discontinuités qui passaient par un point fixe dans le champ visuel du conducteur (Denton, 1980). Aucun véhicule dans la voie du participant ou venant en sens inverse n'était présent tout au long de l'expérimentation. La limite de vitesse était fixée à 90 km/h.

2.3. Procédure

Les participants ont d'abord été informés qu'ils devraient rouler comme s'ils conduisaient leur propre véhicule sur une route rurale bidirectionnelle, tout en respectant la limite de vitesse de 90 km/h. Après avoir rempli le formulaire de consentement, les participants étaient ensuite invités à s'asseoir dans le simulateur et à ajuster leur siège pour se sentir à l'aise. Il leur a ensuite été donné la possibilité de se familiariser avec le simulateur et l'environnement virtuel en circulant sur une route rurale sinueuse présentant des virages de longueur et de rayon de courbure variable dans les deux directions (une période de familiarisation a été prévue avant chaque configuration de simulateur). Chaque participant a ensuite effectué une session de conduite avec chaque configuration de simulateur dans un ordre contrebalancé parmi les participants. Six répétitions pour chaque virage et pour chaque configuration de simulateur ont donc été recueillies. Chaque session de conduite durait approximativement 8 minutes, en fonction de la vitesse de conduite des participants.

2.4. Variables dépendantes et analyse statistique

Le comportement de conduite a été analysé au travers de la vitesse et de la position latérale. La vitesse correspondait à la vitesse moyenne pour l'ensemble du virage. La position latérale a été définie comme la distance en centimètres séparant le centre du véhicule du participant et le centre de sa voie de circulation (ou déviation latérale). Afin d'exprimer la position latérale indépendamment de la direction du virage, les valeurs positives correspondaient à une déviation vers le bord intérieur du virage et les valeurs négatives correspondaient à une déviation vers le bord extérieur du virage.

Trois variables relatives à la position latérale ont été calculées: la position latérale à l'approche du virage ($LP_{Approche}$), la position latérale à l'entrée du virage ($LP_{Entrée}$) et la position latérale à l'apex (LP_{Apex}). La variable $LP_{Approche}$ correspondait à la position latérale instantanée 25 m avant l'entrée dans le virage, distance à laquelle les conducteurs contrôlent déjà leur locomotion en lien avec le prochain virage (à une vitesse de 90 km/h, voir Wilkie et Wann, 2003). $LP_{Entrée}$ correspondait à la position latérale instantanée au moment d'entrer dans le virage (i.e., à 0 m dans la courbe). Enfin, LP_{Apex} correspondait à la position latérale instantanée lorsque le conducteur atteignait l'apex de la courbe (i.e., à 100 m dans le virage).

Pour obtenir une vue d'ensemble de la façon dont les participants utilisaient la largeur de voie en fonction des facteurs manipulés, deux autres variables liées à la position latérale ont été calculées: la position latérale maximale (LP_{Max}) et le temps passé hors de la voie. LP_{Max} correspondait à la position la plus proche du bord intérieur du virage tout au long de la courbe. Le temps passé hors de la voie a été défini comme le pourcentage du temps total pendant lequel une partie du véhicule du participant (rétroviseurs exclus) se trouvait à l'extérieur de la limite intérieure de la voie.

Les effets possibles de la configuration du simulateur et de la direction du virage ont été évalués sur toutes les variables dépendantes à l'aide d'ANOVAs à mesure répétées selon le plan factoriel suivant : 3 (Simulateur : sans cabine virtuelle, avec cabine virtuelle, intermédiaire) \times 2 (Direction de virage: gauche, droite). Les traitements statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel Statistica (StatSoft Inc, USA). Le seuil de significativité était fixé à .05. Le test de sphéricité de Mauchly a été utilisé pour déterminer si l'hypothèse de sphéricité était violée. En cas de violation, une correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée pour ajuster les degrés de liberté et analyser les effets. Les comparaisons a posteriori ont été réalisées à l'aide du test de Tukey (HSD). Pour chaque effet, l'éta-carré partiel (η_p^2) a été calculé pour déterminer la proportion de variance totale de la variable dépendante qui est expliquée par la variable indépendante. Les statistiques descriptives ont été reportées avec moyennes et écarts-types (moyenne \pm EC).

3. Résultats

La Figure 5 représente la vitesse adoptée par les participants dans les deux directions de virage pour chaque simulateur de conduite. L'ANOVA a révélé que la vitesse de conduite a été influencée par le type de simulateur ($F_{2,48} = 0.26$, $p = .009$, $\eta_p^2 = .18$), avec une vitesse plus élevée dans le simulateur avec cabine (91 ± 11 km/h) que dans le simulateur intermédiaire (85 ± 7 km/h). Aucun autre effet principal ou d'interaction n'a été observé.

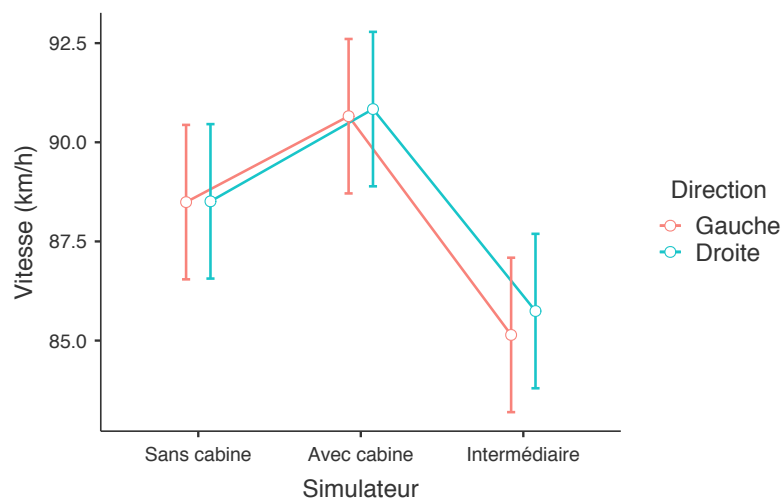


Figure 5. Vitesse moyenne pratiquées par les participants dans les trois simulateurs de conduite, en fonction de la direction du virage. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

La Figure 6 **Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.** représente la position latérale adoptée par les participants avant et pendant le virage dans toutes les conditions expérimentales. L'ANOVA réalisée sur la position latérale 25 m avant le virage ($LP_{Approche}$) a révélé une interaction significative entre la configuration du simulateur et la direction du virage ($F_{2,48} = 11.53$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .32$). En approchant les virages à gauche, la déviation latérale vers le bord extérieur du virage dans le simulateur sans cabine (-36 ± 31 cm) et dans le simulateur intermédiaire (-37 ± 37 cm) était significativement plus importante que dans le simulateur avec cabine (-17 ± 34 cm). En approchant

les virages à droite, la déviation latérale vers le bord extérieur dans le simulateur avec cabine (-28 ± 29 cm) était significativement plus importante que dans le simulateur sans cabine (-7 ± 37 cm) et dans le simulateur intermédiaire (-13 ± 27 cm).

L'ANOVA pour $LP_{\text{Entrée}}$ a révélé un effet principal du simulateur ($F_{2,48} = 24.40$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .50$), et une interaction significative simulateur \times direction ($F_{2,48} = 15.90$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.40$). Aucun autre effet principal ou d'interaction n'a été observé. Au moment d'entrer dans les virages à gauche, la déviation vers le bord extérieur était significativement plus importante dans le simulateur à bas coût sans cabine (-16 ± 28 cm) que dans les deux autres conditions (avec cabine : 2 ± 31 cm; intermédiaire : 4 ± 35 cm), alors que les déviations adoptées par les participants dans les virages à droite se distinguaient toutes significativement (avec cabine : -7 ± 28 cm ; sans cabine : 11 ± 33 cm; intermédiaire : 29 ± 28 cm).

L'ANOVA pour LP_{Apex} a indiqué une interaction significative simulateur \times direction ($F_{2,48} = 9.19$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .28$). Aucun autre effet principal ou d'interaction n'a été observé. Dans les virages à gauche, les participants ont davantage dévié vers le bord intérieur du virage dans le simulateur avec cabine (27 ± 36 cm) que dans le simulateur intermédiaire (4 ± 37 cm), alors que la LP_{Apex} était significativement plus importante dans les virages à droite dans le simulateur sans cabine (45 ± 29 cm) et le simulateur intermédiaire (36 ± 39 cm) que dans le simulateur avec cabine (17 ± 36 cm).

En ce qui concerne la déviation maximale dans la courbe, l'ANOVA pour LP_{Max} a révélé un effet significatif du simulateur ($F_{2,48} = 6.48$, $p = .003$, $\eta_p^2 = .21$), les participants passant significativement plus près du bord intérieur du virage dans la condition sans cabine (78 ± 39 cm) que dans la condition avec cabine (63 ± 33 cm), et une interaction significative simulateur \times direction ($F_{2,48} = 17.48$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .42$). Aucun autre effet principal ou d'interaction n'a été observé. Les valeurs de LP_{Max} étaient similaires pour les trois simulateurs dans les virages à gauche (sans cabine = 63 ± 43 cm; avec cabine = 67 ± 34 cm ; intermédiaire = 58 ± 25 cm), alors que les participants dans les virages à droite ont conduit significativement plus près du bord intérieur du virage dans les simulateurs à bas coût sans cabine (93 ± 30 cm) et intermédiaire (84 ± 26 cm) que dans le simulateur à bas coût avec cabine (58 ± 32 cm).

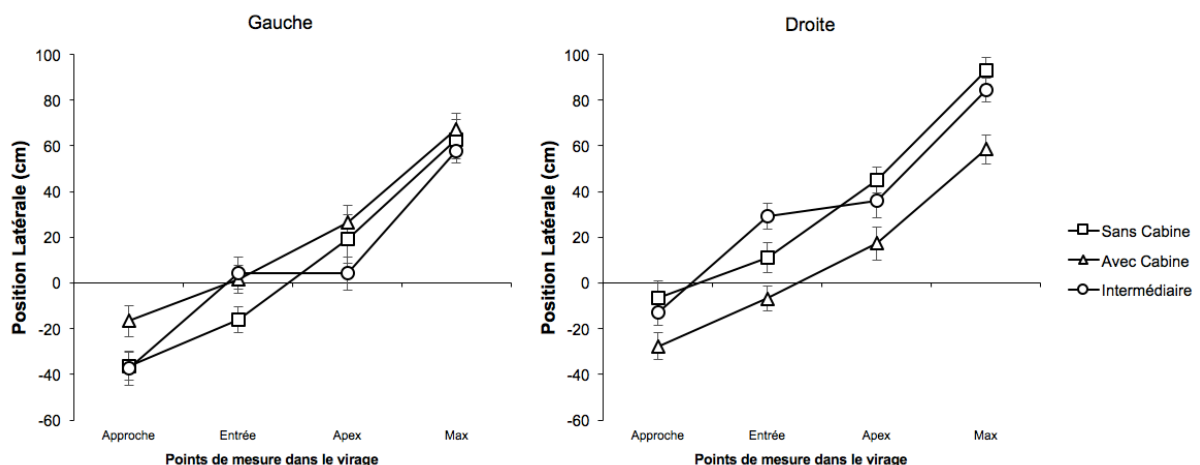


Figure 6. Position latérale aux différents points de mesure dans le virage pour le simulateur sans cabine (carrés), avec cabine (triangles) et intermédiaire (cercles) dans les virages à gauche (figure de gauche) et à droite (figure de droite). Le zéro représente le centre de la voie. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

Enfin, le temps passé hors de la voie (voir Figure 7) a été affecté par une interaction significative simulateur \times direction ($F_{2,48} = 4.65$, $p = .014$, $\eta_p^2 = .16$). Aucun autre effet principal ou d'interaction n'a été observé. Dans les virages à gauche, le temps passé hors de la voie était similaire entre les

trois conditions (sans cabine : $6 \pm 14 \%$; avec cabine : $7 \pm 12 \%$; intermédiaire : $4 \pm 12 \%$), tandis que le temps passé hors de la voie dans les virages à droite était significativement plus important dans le simulateur sans cabine ($12 \pm 13 \%$) que dans les deux autres simulateurs (avec cabine : $4 \pm 7 \%$; intermédiaire : $7 \pm 8 \%$).

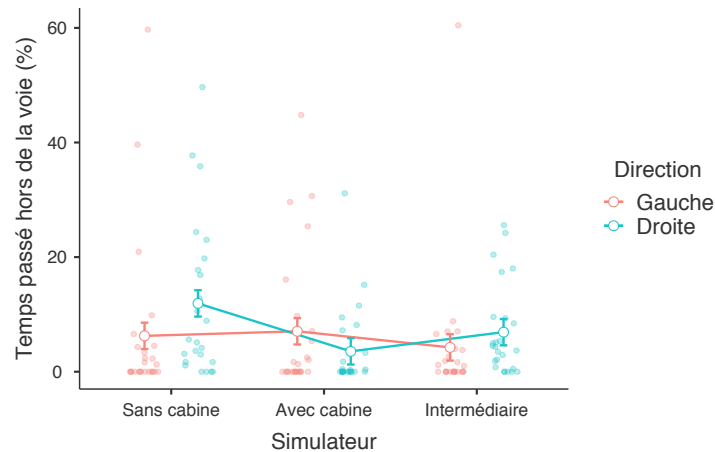


Figure 7. Temps passé hors de la voie dans les trois simulateurs de conduite, en fonction de la direction du virage. Les points représentent les moyennes individuelles et les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

4. Discussion

Dans la présente étude, nous avons comparé le contrôle latéral de conducteurs engagés dans une tâche de négociation de virages dans trois configurations de simulateurs : (i) un simulateur à bas coût dépourvu de cabine représentant le gabarit d'un véhicule, (ii) un simulateur à bas coût en présence d'une cabine complète virtuelle, affichée dans l'environnement de simulation, (iii) un simulateur intermédiaire équipé d'une cabine physique partielle, qui ne représente pas le gabarit réel d'un véhicule. Contrairement à de nombreuses études de comparaison de simulateurs, les configurations de simulateurs utilisées dans cette étude nous ont permis d'explorer de façon quasi-contrôlée (champ visuel horizontal constant entre les trois simulateurs, mais commandes distinctes pour le simulateur intermédiaire) les effets induits par la présence d'une cabine complète et d'une cabine partielle sur le comportement de conduite. Les résultats ont montré que l'information émanant de la cabine influence à la fois la vitesse adoptée et le positionnement latéral dans la voie.

4.1. Vitesse

Les participants ont roulé à une vitesse significativement plus élevée dans le simulateur à bas coût avec cabine (91 km/h) que dans le simulateur intermédiaire (85 km/h). Etant donné que la condition avec cabine était la seule à envelopper totalement les participants – reproduisant ainsi la restriction du champ visuel existante en situation réelle –, ce résultat est probablement dû à un effet de la cabine complète sur la perception de la vitesse propre (pour rappel, les participants n'avaient pas de retour d'information quant à leur vitesse instantanée). En effet, la présence d'une cabine complète a pour conséquence de masquer une large part des éléments défilant dans le champ visuel du conducteur du fait du déplacement de l'observateur dans l'environnement, en particulier dans la région dite proche du conducteur (i.e., directement en avant du conducteur, Salvucci & Gray, 2004). La moindre quantité de stimulations visuelles dans le simulateur avec cabine a ainsi pu produire une sous-estimation de la vitesse pratiquée, menant les participants à adopter une vitesse supérieure dans cette condition. Bien que non significative, la différence de vitesse entre les conditions avec et sans cabine dans le simulateur à bas coût corrobore une telle hypothèse, puisque la vitesse pratiquée en l'absence de cabine était inférieure à celle pratiquée avec cabine. Il est toutefois également

possible que le simulateur intermédiaire, du fait du plus grand réalisme du poste de conduite (commandes issues d'un véhicule réel) ou de la plus grande sophistication du retour d'effort au volant (en particulier le retour d'information continu des micro-vibrations du véhicule dans le volant), ait contribué à une meilleure perception de la vitesse propre.

Un autre résultat important est que les participants ont maintenu leur vitesse inchangée entre les deux directions de virage au sein de chaque condition de simulateur. Ce constat implique que les différences de contrôle latéral induites par la direction de virage qui seront discutées dans la section suivante ne peuvent être dues à des niveaux différents de contraintes spatio-temporelles pesant sur le système perceptivo-moteur.

4.2. Position Latérale

L'analyse des données de position latérale a montré des différences claires de contrôle latéral entre les simulateurs en fonction de la direction de la déviation latérale engagée par les participants.

En effet, lorsque la stratégie locomotrice exigeait de se déplacer vers la gauche (i.e., à l'approche et à l'entrée des virages à droite, et à l'apex des virages à gauche), les participants ont davantage dévié dans cette direction dans le simulateur avec cabine virtuelle que dans les deux autres simulateurs (ou que du seul simulateur intermédiaire à l'apex). Cette différence de positionnement n'était plus observée pour la LP_{Max} dans les virages à gauche, pour laquelle les valeurs étaient remarquablement proches entre les trois simulateurs. Pour cette raison, le temps passé hors de la voie pour l'ensemble des virages à gauche était lui aussi similaire entre les trois conditions de simulateur. Ainsi, bien que la présence d'une cabine complète a parfois entraîné une augmentation significative de la déviation latérale vers la gauche, les données de déviation latérale maximale et de temps passé hors de la voie corroborent l'idée selon laquelle le bord gauche du véhicule n'a pas besoin d'être spécifié pour être correctement estimé.

Lorsque la stratégie locomotrice exigeait de se déplacer vers la droite, toutes les mesures de positionnement latéral ont confirmé que les simulateurs sans cabine et à cabine partielle ont induit une plus grande déviation dans cette direction que le simulateur avec cabine. En effet, à l'approche des virages à gauche, les participants ont beaucoup plus dévié vers le bord extérieur de la voie dans les simulateurs sans cabine et à cabine partielle parce que cette région se trouvait en direction du bord distant (droit) du véhicule. A l'apex et pour la LP_{Max} , les participants dans les simulateurs sans cabine et à cabine partielle ont davantage dévié du centre de la voie vers le bord intérieur du virage dans les virages à droite. Le seul point de mesure pour lequel les positionnements dans les simulateurs sans cabine et avec cabine partielle ne se distinguaient pas tous deux du simulateur avec cabine était l'entrée des virages à gauche. A ce point de mesure, seule la déviation vers le bord extérieur du virage en l'absence de cabine était significativement supérieure à celle observée dans les deux autres simulateurs. A l'échelle de l'ensemble du virage, il est important de remarquer que les différences dans les trajectoires empruntées par les participants en fonction du simulateur ont entraîné une augmentation significative du temps passé hors de la voie dans le simulateur sans cabine dans les virages à droite. Ce résultat suggère ainsi que la sous-estimation de la distance jusqu'au bord distant, et donc la largeur du véhicule, était plus forte dans le simulateur sans cabine que dans le simulateur intermédiaire.

5. Conclusion

Cette première étude avait pour objectif d'étudier les effets de l'information émanant d'une cabine complète virtuelle et d'une cabine partielle physique sur le contrôle latéral du véhicule dans une tâche de négociation de virages. Les résultats obtenus mettent en évidence les répercussions de l'absence d'une cabine représentant le gabarit réel du véhicule sur les stratégies de positionnement latéral dans les virages.

Presque toutes les mesures de positionnement latéral ont confirmé que les simulateurs sans cabine et à cabine partielle ont induit une plus grande déviation latérale que le simulateur avec cabine complète lorsque la stratégie locomotrice exigeait de se déplacer vers la droite. A l'approche, les participants ont davantage dévié dans ces deux simulateurs vers le bord extérieur de la voie lorsque cette région se trouvait sur le côté droit du véhicule (i.e., dans les virages à gauche). A l'apex, les participants ont davantage dévié dans ces deux simulateurs vers le bord intérieur de la voie dans les virages à droite. L'analyse de la LP_{Max} a également montré de plus grandes déviations latérales maximales vers le bord intérieur de la voie dans ces deux simulateurs dans les virages à droite mais pas dans les virages à gauche. Dans le simulateur sans cabine, ces déviations latérales accrues ont été accompagnées d'une augmentation significative du temps passé en dehors de la voie dans les virages à droite, ce qui montre que les trajectoires plus excentrées prises par les participants en l'absence de cabine n'étaient pas adaptées à la largeur de la voie et ont entraîné des erreurs de conduite. Concernant les déviations latérales vers la gauche, bien que des différences significatives entre le simulateur avec cabine complète et les deux autres simulateurs ont été observées à certains points de mesure (à l'approche des virages à droite et à l'apex des virages à gauche), le fait que les déviations latérales maximales étaient presque identiques entre les trois simulateurs dans les virages à gauche suggère fortement que le bord gauche du véhicule a été estimé de façon similaire par les participants qu'ils disposent ou non d'informations visuelles le représentant.

En conclusion, cette étude a montré que l'utilisation d'un simulateur à bas coût sans cabine ou d'un simulateur intermédiaire avec une cabine partielle peut induire des mesures de contrôle latéral non fiables. Pour cette raison, il est particulièrement recommandé d'ajouter une cabine complète virtuelle à l'échelle 1 dans les recherches menées avec des simulateurs de conduite à bas coût, car cela est susceptible d'augmenter la fiabilité des données recueillies pour un budget strictement constant. Ainsi, dans les autres études du projet PROFIL+, un simulateur à bas coût avec affichage d'une cabine virtuelle complète a été utilisé pour examiner les comportements de conduite.

Points à retenir

- Les mesures de position latérale en virage sont fortement influencées par la configuration du simulateur de conduite.
- Lorsque le simulateur ne fournit pas aux conducteurs le support informationnel leur permettant de s'adapter aux contraintes spatiales que représente la route, la planification de la trajectoire est altérée et peut conduire à des erreurs de positionnement.
- A l'approche d'un virage à gauche, il a été observé, sur simulateur sans cabine ou avec cabine partielle, que les conducteurs ont tendance à se positionner davantage vers l'extérieur de la voie.
- Dans un virage à droite, la stratégie naturelle consistant à couper le virage les amène à dévier davantage vers l'intérieur de leur voie, comparativement à un simulateur avec cabine virtuelle complète.
- Cela induit un temps passé hors de la voie plus élevé, en particulier sur simulateur sans représentation de la cabine.

III. Etude 2. Analyse du contrôle latéral en virage avec et sans bande dérasée

1. Introduction

La conduite automobile en virage est une tâche locomotrice complexe qui nécessite d'adapter le déplacement du véhicule à la courbure de la route tout en gardant une distance adéquate vis-à-vis des limites de la voie de circulation. Cette tâche est reconnue comme une tâche critique de sécurité depuis des décennies, puisqu'il a été démontré de manière répétée et dans différentes régions du monde que le taux d'accidents sur les sections courbes de la route est bien plus élevé que sur les sections droites (de 2 à 4,5 plus élevé, voir Charlton & de Pont, 2007 ; Glennon et al., 1985 ; Hummer et al., 2010 ; Johnston 1982 ; Leonard et al., 1994).

Une des contremesures les plus régulièrement avancées pour diminuer les accidents par sortie de voie dans les virages est d'installer ou d'élargir une bande dérasée adjacente aux voies de circulation (OECD, 1999; SETRA, 2002; Zeeger et al., 1990). S'il est bien établi que les bandes dérasées revêtues sont associées à une réduction statistiquement significative de la fréquence des sorties de voie sur les routes rurales bidirectionnelles (Zeeger & Council, 1995 ; Ogden, 1997), les études ayant examiné les effets de la présence et de la largeur de la bande dérasée sur le comportement de conduite en virage sont rares (Bella, 2013 ; Ben-Bassat & Shinar, 2011 ; voir également Abele & Møller, 2011). Comme déjà mentionné dans l'état de l'art du présent livrable, les études existantes ont examiné les effets de la largeur de la bande dérasée (0,50, 1,20 m et 3 m, in Ben-Bassat & Shinar, 2011) ou de la présence d'une bande dérasée (absence vs. présence d'une bande dérasée de 0,50 m in Bella, 2013) en fonction de la configuration du bord de la chaussée (présence ou absence d'une glissière de sécurité) et de la géométrie de la route (section droite, virage à gauche peu serré, virage à gauche serré, virage à droite peu serré, virage à droite serré). Il a été montré que les participants adoptent des vitesses plus élevées en présence d'une bande dérasée (Bella, 2013) et lorsque la bande dérasée est plus large mais uniquement en présence d'une glissière de sécurité (Ben-Bassat & Shinar, 2011). Concernant les stratégies de positionnement latéral, Ben-Bassat et Shinar (2011) ont montré que les participants conduisaient près du côté gauche de la voie lorsque la bande dérasée était étroite (0,50 m), mais se déplaçaient vers le milieu de la voie et vers le côté droit de la voie lorsque la largeur de la bande dérasée augmentait (1,20 et 3,00 m, respectivement). Cet effet de la largeur de la bande dérasée sur la position latérale du conducteur était renforcé en présence d'une glissière de sécurité, mais n'a pas été affecté par la géométrie de la route. Ces résultats ont été confirmés par ceux obtenus par Bella (2013), qui a montré que la présence d'un accotement de 0,50 m produisait une position plus éloignée de 0,20 m du centre de la route, quelle que fut la configuration du bord de la chaussée et la géométrie de la route.

Bien qu'ils convergent, les résultats de ces deux études sont quelque peu étonnants dans la mesure où ils démontrent des effets importants de la présence de la bande dérasée sur la façon dont les conducteurs utilisent l'espace de leur voie pour négocier les virages, mais indiquent également que ces effets ne sont pas modulés par la direction du virage. Cette observation est surprenante car l'espace supplémentaire fourni par une bande dérasée ne modifie pas les contraintes induites par le fait de produire une trajectoire courbe de la même manière dans les virages à gauche et à droite. Sur les routes bidirectionnelles, étant donné que la bande dérasée adjacente à la voie de circulation est située à sa droite quelle que soit la direction de la courbe, on peut imaginer que sa présence induise les conducteurs une plus grande déviation vers le bord intérieur de la voie dans les virages à droite afin d'aplanir leur trajectoire car ils bénéficient d'un espace supplémentaire au-delà du marquage de rive. En revanche, dans les virages à gauche, il est plus difficile d'imaginer les conducteurs se déplacer davantage vers le bord intérieur de la voie en présence d'une bande dérasée (et se placer ainsi plus proche du trafic venant en sens inverse), puisque sa présence n'implique pas d'espace supplémentaire au-delà du marquage central. Par conséquent, au plan logique, une hypothèse qui pourrait être formulée serait que la présence d'une bande dérasée influence la négociation des

virages de manière distincte en fonction de leur direction, en contribuant à renforcer la stratégie consistant à couper le virage dans les virages à droite uniquement.

De manière intéressante, un examen approfondi des données de position latérale publiées dans la littérature antérieure révèle un certain degré de cohérence avec cette hypothèse. Dans l'étude de Bella (2013), la présence de bandes dérasées a provoqué une nette augmentation de la déviation du centre de la voie vers le bord intérieur de la voie dans les virages à droite serrés (31 cm et 70 cm dans les conditions sans et avec bande dérasée), alors que la différence de déviation entre ces deux conditions n'était que de 5 cm dans les virages à gauche serrés. De même, dans l'étude de Ben-Bassat et Shinar (2011), la déviation latérale du centre de la voie vers le bord intérieur de la voie était similaire dans les virages à gauche peu serrés (32 cm, 43 cm et 43 cm dans les conditions d'accotement de 0,50 m, 1,20 m et 3,00 m), alors qu'elle augmentait substantiellement avec la largeur de la bande dérasée dans les virages à droite peu serrés (35, 53 et 70 cm). Ainsi, lorsque l'on resserre l'analyse sur seulement quelques caractéristiques géométriques de la route, il apparaît que la présence et l'élargissement d'une bande dérasée ont donné lieu à une plus grande déviation latérale vers le bord intérieur du virage dans les virages à droite uniquement. Il semble donc plausible que l'absence de différences statistiquement significatives dans les études antérieures puisse davantage tenir d'un plan factoriel spécifique (i.e., un facteur de géométrie routière intégrant à la fois la direction du virage, leur rayon de courbure et les sections droites) que d'une véritable absence d'interaction entre les effets produits par bande dérasée et la direction de la courbe. Par conséquent, s'il est bien établi que les bandes dérasées revêtues sont associées à une réduction statistiquement significative de la fréquence des accidents par sorties de voie sur les routes rurales bidirectionnelles (Zeeger & Council, 1995 ; Ogden, 1997), ses effets sur les stratégies de positionnement latéral ne sont que partiellement connus et méritent d'être étudiés de manière plus rigoureuse en relation avec la direction du virage.

Pour clarifier ces questions, la présente étude a examiné la façon dont les trajectoires locomotrices sur les routes rurales bidirectionnelles – décrites par plusieurs points de mesure avant et pendant le virage – peuvent être affectées par la présence d'une bande dérasée dans les virages à gauche et à droite. Il a été postulé que la présence d'une bande dérasée ou une augmentation de sa largeur amènerait les conducteurs à davantage couper les virages à droite mais pas les virages à gauche. Cette hypothèse a été testée en manipulant les contraintes exercées sur le contrôle latéral en utilisant une voie de circulation étroite et large (2,75 et 3,50 m) afin de déterminer si les éventuels effets induits par la bande dérasée peuvent être généralisés à différents espaces de manœuvre. Cette étude visait également à documenter l'impact du trafic venant en sens inverse sur les stratégies de prise de virage en présence et en absence de bande dérasée. Des recherches antérieures ont montré que la présence de trafic en sens inverse poussait les conducteurs à adopter une position excentrée vers le marquage de rive (Dijksterhuis et al., 2011 ; Mecheri et al., 2017). Il a été postulé que les participants, en présence de trafic, seraient moins enclins à augmenter progressivement leur déviation latérale vers le bord intérieur du virage pour aplanir leur trajectoire dans les virages à droite en raison d'un positionnement déjà proche du marquage de rive avant même l'entrée dans le virage. Considérant que les conducteurs n'assimileront pas la bande dérasée comme un espace roulant mais seulement comme une zone de récupération, il était attendu que les stratégies consistant à couper les virages seraient inhibées dans les virages à droite en présence de trafic.

2. Méthode

2.1. Participants

Trente participants, tous ayant une vision normale ou corrigée, se sont portés volontaires pour participer à cette étude cette expérimentation qui était approuvée par le comité d'éthique local. Les participants avaient leur permis de conduire depuis au moins deux ans et avaient une expérience de

conduite d'au moins 20 000 km. Ils ont été assignés au groupe « trafic » (n=15 ; 8 femmes, 7 hommes), dans lequel des véhicules circulaient en sens inverse, ou au groupe « sans trafic » (n=15 ; 9 femmes, 6 hommes), dans lequel il n'y avait pas de véhicules venant en sens inverse. Il n'y avait pas de différences significatives entre les groupes en ce qui concerne l'âge, les années d'expérience de conduite et les kilomètres parcourus. Tous les participants ont donné leur consentement éclairé avant d'être inclus dans l'étude et étaient naïfs quant aux hypothèses expérimentales.

2.2. Dispositif expérimental

L'expérimentation a été menée à l'aide d'un simulateur de conduite à bas coût composé d'un volant à retour de force, de pédales et d'une boîte de vitesses (Logitech G25) montés sur un siège de type voiture de course. En lien avec les résultats issus de la première étude du projet PROFIL+, une cabine complète virtuelle représentant le gabarit du véhicule piloté à l'échelle 1 a été utilisée afin de capturer de façon effective les stratégies de contrôle latéral des participants (largeur du véhicule simulé = 1.60 m, rétroviseurs exclus). L'environnement visuel était affiché sur trois écrans de 1,22 m de large et 0,70 m de haut (fréquence de rafraîchissement de 60 Hz, avec une résolution de 3840 × 2160 pixels). La distance entre la tête des participants et le centre de chaque écran était de 1,05 m. Dans cette configuration, l'angle visuel formé par les trois écrans était de 180° horizontalement et de 37° verticalement. Trois haut-parleurs ont généré des bruits moteur et environnementaux réalistes pour améliorer l'expérience du conducteur. Le compteur de vitesse était affiché pendant l'expérimentation. Les données ont été recueillies à une fréquence d'échantillonnage de 60 Hz et comprenaient des informations sur le comportement du conducteur (actions sur le volant et les pédales) et le véhicule simulé (position et vitesse).

La route expérimentale était une route rurale bidirectionnelle de rase campagne d'une longueur de 12,5 km. Le tracé de la route consistait en une série de 12 virages ordonnés de façon aléatoire (6 virages à gauche et 6 virages à droite), séparés par des sections droites de 750 m. Tous les virages avaient un rayon de courbure et une longueur de 200 m, mesurée à partir du centre de la route. La surface de la route était texturée et marquée sur les bords par une ligne discontinue de 0,18 m de largeur sur les bords et de 0,15 m au centre. Le terrain environnant correspondait à un environnement rural de rase campagne contenant des arbres placés avec un écart minimum de 20 m du bord de la route. L'espacement des arbres était aléatoire, mais répété tous les 100 m afin de contrôler le nombre de discontinuités qui passaient par un point fixe dans le champ visuel du conducteur (Denton, 1980). La limite de vitesse était fixée à 90 km/h.

2.3. Conditions expérimentales

Les participants ont conduit sur un total de 6 routes rurales expérimentales (Figure 8) correspondant à deux largeurs de voies (3,50 et 2,75 m) et trois largeurs de bande dérasée (0, 0,75 et 1,25 m) différentes. À l'exception des largeurs de voie et de bande dérasée, les routes expérimentales étaient identiques au plan de la géométrie. Les largeurs de voie ont été déterminées sur la base des recommandations pour la conception routière en France (c'est-à-dire 3,50 m ; voir Hall et al., 1998). La largeur des bandes dérasées a été déterminée en s'appuyant sur la réglementation française pour les accotements jugés appropriés pour la pratique cycliste sur les routes rurales, avec les largeurs 0,75 m et 1,25 m correspondant respectivement aux largeurs minimales et recommandées. Le marquage de rive n'était pas inclus dans la largeur de la voie ou de la bande dérasée. Quelle que soit la largeur de la voie ou de la bande dérasée, la distance entre le bord de la route et les arbres était constante.

Les participants ont conduit sur ces 6 routes avec et sans trafic venant en sens inverse. La condition trafic correspondait à un trafic continu (10 VL/min, soit une distance de 150 m entre les VL), tous roulant à 90 km/h et positionnés de sorte que la distance entre le bord gauche des véhicules (à l'exclusion du rétroviseur) et la ligne axiale était de 0,60 m dans les deux conditions de largeur de voie. La condition sans trafic ne présentait aucun véhicule dans la voie opposée. Dans ces deux conditions, aucun véhicule n'était présent dans la voie du participant.

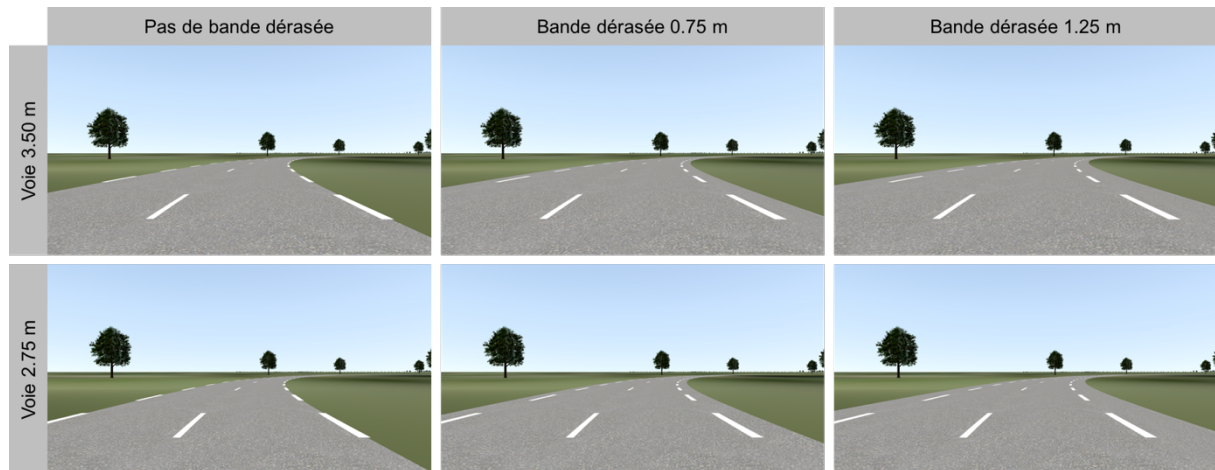


Figure 8. Illustration des six routes expérimentales utilisées dans l'expérimentation.

2.4. Procédure

Les participants ont d'abord été informés qu'ils devraient rouler comme s'ils conduisaient leur propre véhicule sur une route rurale bidirectionnelle, tout en respectant la limite de vitesse de 90 km/h. Après avoir rempli le formulaire de consentement, les participants étaient ensuite invités à s'asseoir dans le simulateur et à ajuster leur siège pour se sentir à l'aise. Il leur a ensuite été donné la possibilité de se familiariser avec le simulateur et l'environnement virtuel en circulant sur une route rurale sinueuse présentant des virages de longueur et de rayon de courbure variable dans les deux directions. Les participants ont ensuite conduit sur chacune des 6 routes dans un ordre contrebalancé. Le temps de conduite, fonction de la vitesse à laquelle les participants ont roulé, était approximativement de 8 minutes.

2.5. Variables dépendantes et analyse statistique

Le comportement de conduite a été analysé au travers de la vitesse et de la position latérale. La vitesse correspondait à la vitesse moyenne pour l'ensemble du virage. La position latérale a été définie comme la distance en centimètres séparant le centre du véhicule du participant et le centre de sa voie de circulation (ou déviation latérale). Afin d'exprimer la position latérale indépendamment de la direction du virage, les valeurs positives correspondaient à une déviation vers le bord intérieur du virage et les valeurs négatives correspondaient à une déviation vers le bord extérieur du virage.

Trois variables relatives à la position latérale ont été calculées: la position latérale à l'approche du virage ($LP_{Approche}$), la position latérale à l'entrée du virage ($LP_{Entrée}$) et la position latérale à l'apex (LP_{Apex}). La variable $LP_{Approche}$ correspondait à la position latérale instantanée 25 m avant l'entrée dans le virage, une distance à laquelle les conducteurs contrôlaient déjà leur locomotion en lien avec le prochain virage (à une vitesse de 90 km/h, voir Wilkie et Wann, 2003). $LP_{Entrée}$ correspondait à la position latérale instantanée au moment d'entrer dans le virage (i.e., à 0 m dans la courbe). Enfin, LP_{Apex} correspondait à la position latérale instantanée lorsque le conducteur atteignait l'apex de la courbe (i.e., à 100 m dans le virage).

Pour obtenir une vue d'ensemble de la façon dont les participants utilisaient la largeur de voie en fonction des facteurs manipulés, deux autres variables liées à la position latérale ont été calculées: la position latérale maximale (LP_{Max}) et le temps passé hors de la voie. LP_{Max} correspondait à la position la plus proche du bord intérieur du virage tout au long de la courbe. Le temps passé hors de la voie a été défini comme le pourcentage du temps total pendant lequel une partie du véhicule du participant (rétroviseurs exclus) se trouvait à l'extérieur de la limite intérieure de la voie.

Les conditions avec et sans trafic ont été analysées séparément en raison des stratégies de positionnement radicalement différentes qu'elles induisent (voir Dijksterhuis et al., 2011; Mecheri et al., 2017). Pour chaque condition de trafic, les effets possibles de la largeur de voie, de la largeur de la bande dérasée et de la direction du virage ont été évalués sur toutes les variables dépendantes à l'aide d'ANOVAs à mesure répétées selon le plan factoriel suivant : 2 (Largeur de Voie : 2.75, 3.50m) × 3 (Largeur de la bande dérasée : 0, 0.75, 1.25m) × 2 (Direction : gauche, droite). Les traitements statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel Statistica (StatSoft Inc, USA). Le seuil de significativité était fixé à .05. Le test de sphéricité de Mauchly a été utilisé pour déterminer si l'hypothèse de sphéricité était violée. En cas de violation, une correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée pour ajuster les degrés de liberté et analyser les effets. Les comparaisons a posteriori ont été réalisées à l'aide du test de Tukey (HSD). Pour chaque effet, l'éta-carré partiel (η_p^2) a été calculé pour déterminer la proportion de variance totale de la variable dépendante qui est expliquée par la variable indépendante. Les statistiques descriptives ont été reportées avec moyennes et écarts-types (moyenne ± EC).

3. Résultats

La Figure 9 représente la position latérale adoptée par les participants à l'approche des virages et dans les virages en absence et en présence de trafic. La Figure 10 montre le temps passé hors de la voie en absence et en présence de trafic.

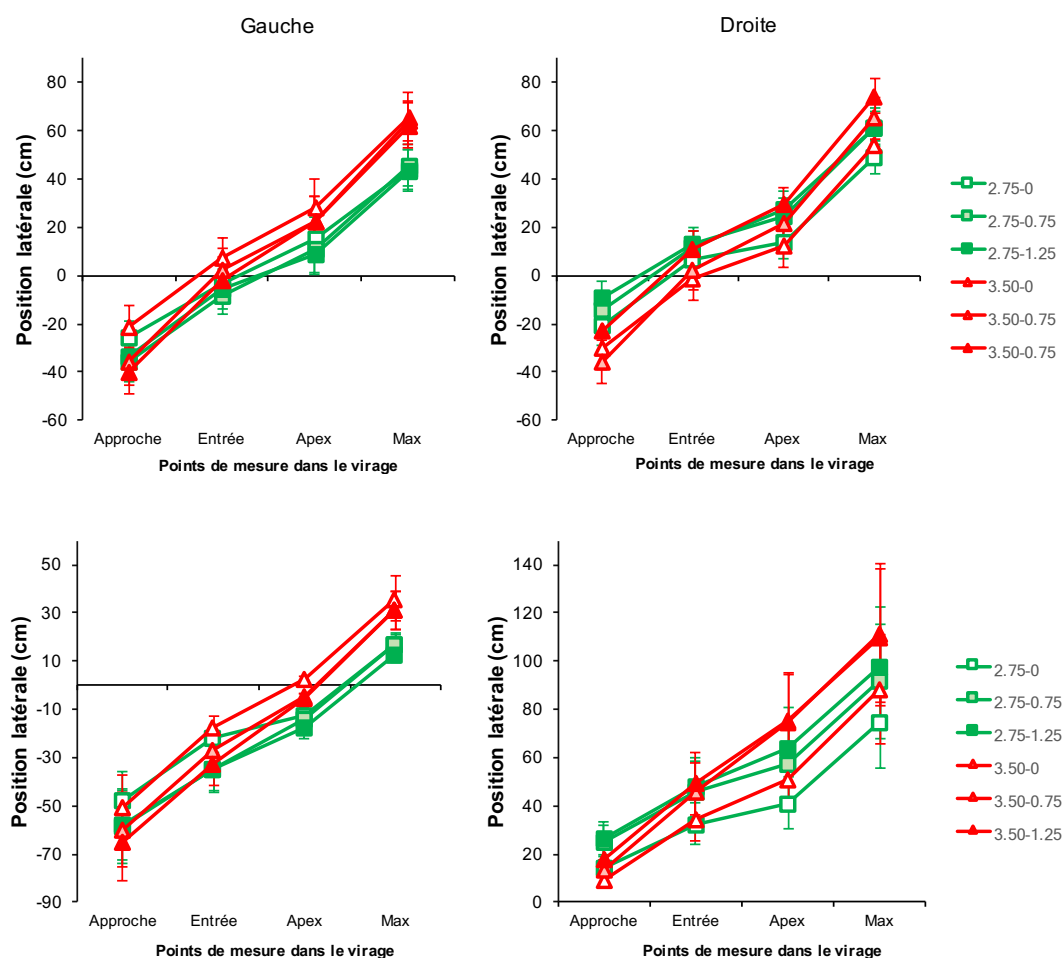


Figure 9. Position latérale moyenne aux différents points de mesure en fonction de la largeur de la voie, de la largeur de la bande dérasée et de la direction du virage, en absence (haut) et en présence (bas) de trafic. Le zéro représente le centre de la voie. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

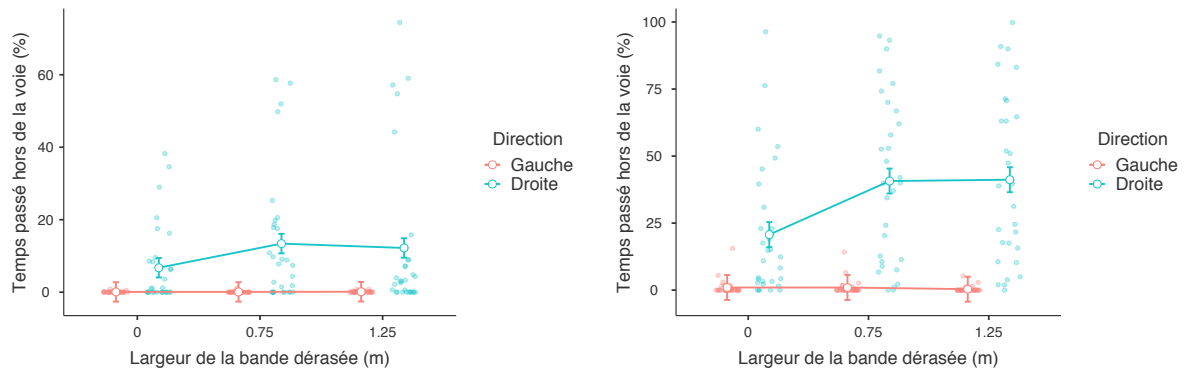


Figure 10. Temps passé hors de la voie en fonction de la largeur de la bande dérasée et de la direction du virage, en absence (gauche) et en présence (droite) de trafic. Les points représentent les moyennes individuelles et les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

3.1. Conduite sans trafic

Vitesse

La vitesse de conduite n'a pas été influencée par la largeur de voie ($F_{1,14} = 2.71$, $p = .122$), la largeur de la bande dérasée ($F_{2,28} = 0.04$, $p = .958$) ou la direction du virage ($F_{1,14} = 0.18$, $p = .676$). Aucun effet d'interaction n'a été observé. Les participants ont roulé à une vitesse moyenne de 85 ± 7 km/h tout au long de l'expérimentation.

LP_{Approche}

L'ANOVA pour LP_{Approche} a révélé un effet principal significatif de la largeur de la voie ($F_{1,14} = 21.22$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .60$) et de la largeur de la bande dérasée ($F_{2,28} = 5.58$, $p = .009$, $\eta_p^2 = .28$). Elle a également indiqué deux interactions significatives entre la largeur de la voie et la direction du virage ($F_{1,14} = 7.86$, $p = .014$, $\eta_p^2 = .36$), et entre la largeur de l'accotement et la direction du virage ($F_{2,28} = 11.25$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .45$). L'interaction largeur de voie \times direction a révélé que les participants ont approché les virages à gauche de manière similaire entre les deux largeurs de voies (-32 ± 29 cm et -32 ± 36 cm dans les voies de 2,75 et de 3,50 m, respectivement), tandis qu'ils ont approché les virages à droite en se positionnant nettement plus près du bord extérieur de la voie dans la voie de 3,50 m (-29 ± 35 cm) que dans la voie de 2,75 m (-15 ± 28 cm). L'interaction bande dérasée \times direction a révélé que les participants ont approché les virages à gauche avec une déviation latérale significativement plus importante vers le bord extérieur en présence (0,75 m = -36 ± 34 cm ; 1,25 m = -37 ± 33 cm) qu'en l'absence d'une bande dérasée (-24 ± 30 cm). En revanche, à l'approche des virages à droite, la déviation latérale vers le bord extérieur était significativement plus faible dans la condition 1,25 m (-16 ± 30 cm) que dans la condition 0,75 m (-25 ± 33 cm) et sans bande dérasée (-25 ± 33 cm).

LP_{Entrée}

A l'entrée du virage, seules les interactions entre la largeur de la voie et la direction du virage ($F_{1,14} = 8.89$, $p = .010$, $\eta_p^2 = .39$), et la bande dérasée et la direction du virage ($F_{2,28} = 6.33$, $p = .005$, $\eta_p^2 = .31$) étaient significatives. Concernant l'interaction largeur de voie \times direction, les tests post-hoc n'ont pas révélé de comparaisons par paires significatives. L'interaction largeur de bande dérasée \times direction a indiqué que les participants sont entrés dans les virages à gauche avec la même déviation latérale dans les trois conditions de bande dérasée (sans bande dérasée = 2 ± 30 cm, 0,75 m = -3 ± 33 cm ; 1,25 m = -4 ± 35 cm), mais ont adopté une déviation significativement plus proche du bord intérieur du virage dans la condition 1,25 m (12 ± 26 cm) qu'en l'absence de bande dérasée (3 ± 31 cm) au moment d'entrer dans les virages à droite.

LP_{Apex}

L'ANOVA pour LP_{Apex} a indiqué un effet principal significatif de la largeur de la voie ($F_{1,14} = 6.53$, $p = .023$, $\eta_p^2 = .32$), montrant une plus grande déviation latérale vers le bord intérieur du virage dans la voie 3.50 m (23 ± 37 cm) que dans la voie 2.75 m (17 ± 32 cm). Les interactions largeur de voie \times direction ($F_{1,14} = 9.44$, $p = .008$, $\eta_p^2 = .41$) et largeur de bande dérasée \times direction ($F_{2,28} = 6.11$, $p = .006$, $\eta_p^2 = .30$) étaient aussi significatives. L'interaction largeur de voie \times direction a indiqué une déviation latérale significativement plus importante vers le bord intérieur de la voie dans la condition 3.50 m (24 ± 42 cm) que dans la condition 2.75 m (12 ± 35 cm) dans les virages à gauche, alors qu'aucune différence significative n'a été observée entre les deux largeurs de voie dans les virages à droite (2.75 m = 22 ± 28 cm; 3.50 m = 21 ± 32 cm). Concernant l'interaction largeur de bande dérasée \times direction, les participants n'ont pas dévié différemment du centre de la voie entre les trois conditions de bande dérasée dans les virages à gauche (sans bande dérasée = 22 ± 41 cm; 0.75 m = 17 ± 39 cm; 1.25 m = 16 ± 36 cm), alors que LP_{Apex} était significativement plus importante dans les virages à droite en présence (0.75 m = 25 ± 31 cm; 1.25 m = 27 ± 29 cm) qu'en absence de bande dérasée (13 ± 30 cm).

LP_{Max}

Concernant la déviation latérale maximale dans le virage, l'ANOVA a révélé des effets principaux significatifs de la largeur de voie ($F_{1,14} = 174.40$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .93$), de la largeur de la bande dérasée ($F_{2,28} = 7.92$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .36$), et des effets interactions significatifs entre la largeur de voie et la direction du virage ($F_{1,14} = 5.95$, $p = .029$, $\eta_p^2 = .30$), et la largeur de la bande dérasée et la direction du virage ($F_{2,28} = 6.56$, $p = .005$, $\eta_p^2 = .32$). L'interaction largeur de voie \times direction a révélé que la déviation latérale vers le bord intérieur du virage dans les virages à gauche était significativement plus importante dans la voie 3.50 m (64 ± 37 cm) que dans la voie 2.75 m (44 ± 32 cm), alors qu'aucune différence significative n'a été observée entre les deux largeurs de voie dans les virages à droite (2.75 m = 57 ± 27 cm; 3.50 m = 65 ± 32 cm). L'interaction largeur de bande dérasée \times direction a révélé des déviations latérales maximales similaires entre les trois conditions de bande dérasée dans les virages à gauche (sans bande dérasée = 55 ± 38 cm ; 0.75 m = 55 ± 34 cm ; 1.25 m = 53 ± 36 cm), alors que les participants, dans les virages à droite, ont adopté des positions latérales maximales significativement plus proches du bord intérieur en présence (0.75 m = 64 ± 30 cm; 1.25 m = 68 ± 29 cm) qu'en absence de bande dérasée (52 ± 29 cm).

Temps passé hors de la voie

Le temps passé hors de la voie a été affecté significativement par la largeur de la voie ($F_{1,14} = 12.45$, $p = .003$, $\eta_p^2 = .47$), évoluant de $2,3 \pm 7,4\%$ dans la voie 3.50 m à $8,6 \pm 17,0\%$ dans la voie 2.75 m, et par la direction du virage ($F_{1,14} = 9.66$, $p = .008$, $\eta_p^2 = .41$), évoluant de $0,1 \pm 0,2\%$ dans les virages à gauche à $10,8 \pm 17,5\%$ dans les virages à droite. Une interaction largeur de voie \times direction significative ($F_{1,14} = 12.01$, $p = .004$, $\eta_p^2 = .46$) a aussi révélé que le temps passé hors de la voie dans les virages à gauche était similaire entre les deux largeurs de voie (2.75 m = $0,2 \pm 0,3\%$; 3.50 m = $0,0 \pm 0,0\%$), alors que les participants ont passé significativement plus de temps hors de la voie 2.75-m ($17,0 \pm 20,9\%$) comparativement à 3.50 m ($4,6 \pm 10,1\%$) dans les virages à droite.

3.2. Conduite avec trafic

Vitesse

L'ANOVA pour la vitesse de conduite a révélé un effet principal significatif de la largeur de voie ($F_{1,14} = 6.24$, $p = .026$, $\eta_p^2 = .31$), ainsi qu'une interaction significative entre la largeur de voie et la direction du virage ($F_{2,28} = 6.24$, $p = .036$, $\eta_p^2 = .21$). Les participants ont roulé à une vitesse significativement plus importante dans la route la plus large ([3.50, 1.25] = 85 ± 6 km/h) que dans la route la plus étroite ([2.75, 1.25] = 83 ± 8 km/h).

LP_{Approche}

L'ANOVA pour LP_{Approche} a révélé un effet principal significatif de la largeur de la voie ($F_{1,14} = 12.99$, $p = .003$, $\eta_p^2 = .48$) montrant une déviation significativement plus importante vers le bord extérieur dans la voie de 3,50 m (-22 ± 47 cm) que dans le couloir de 2,75 m (-16 ± 46 cm). L'ANOVA a également révélé un effet principal significatif de la direction du virage ($F_{1,14} = 49.90$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .78$), et une interaction significative entre la largeur de la bande dérasée et la direction du virage ($F_{2,28} = 11.77$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .46$). Cette interaction a indiqué que les positions latérales adoptées par les participants entre les virages à gauche et à droite se distinguaient significativement pour chaque condition de bande dérasée, en raison du fait que les participants ont approché les virages à gauche à l'extérieur de la courbe (sans bande dérasée = -49 ± 34 cm ; 0.75 m = -59 ± 35 cm ; 1.25 m = -62 ± 35 cm) et les virages à droite à l'intérieur de la courbe (sans bande dérasée = 12 ± 17 cm ; 0.75 m = 20 ± 18 cm, 1.25 m = 22 ± 16 cm). A l'approche des virages à gauche, la déviation latérale vers le bord extérieur de la voie était significativement plus importante en présence qu'en absence de bande dérasée. A l'approche des virages à droite, la déviation latérale vers le bord intérieur de la voie était significativement plus importante dans la condition 1.25 m qu'en absence de bande dérasée.

LP_{Entrée}

Les différences observées dans l'approche ont donné lieu à un effet principal significatif de la largeur de voie pour la variable LP_{Entrée} ($F_{1,14} = 48.38$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .78$), ainsi qu'une interaction significative largeur de bande dérasée \times direction ($F_{2,28} = 22.43$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .62$), présentant presque le même pattern de résultats statistiques qu'au moment de l'approche. Les positions latérales adoptées par les participants entre les virages à gauche et à droite se distinguaient significativement pour chaque condition de bande dérasée. Les participants sont entrés dans les virages à gauche avec une déviation latérale vers le bord extérieur de la voie significativement plus importante en présence (0.75 m = -31 ± 38 cm ; 1.25 m = -34 ± 34 cm) qu'en absence (-20 ± 33 cm) de bande dérasée, et sont entrés dans les virages à droite avec une déviation latérale vers le bord intérieur de la voie qui était significativement plus importante en présence (0.75 m = 46 ± 16 cm ; 1.25 m = 49 ± 12 cm) qu'en absence (34 ± 15 cm) de bande dérasée.

LP_{Apex}

L'ANOVA pour LP_{Apex} a révélé un effet principal significatif de la largeur de voie ($F_{1,14} = 27.59$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .66$), indiquant une déviation latérale significativement plus importante dans la voie 3.50 m (32 ± 45 cm) que dans la voie 2.75 m (20 ± 43 cm). L'ANOVA a aussi révélé un effet principal significatif de la largeur de la bande dérasée ($F_{2,28} = 7.32$, $p = .003$, $\eta_p^2 = .34$), de la direction du virage ($F_{1,14} = 51.62$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .79$), et une interaction significative entre ces deux facteurs ($F_{2,28} = 20.81$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .60$). Dans les virages à gauche, les participants ont adopté une déviation latérale similaire dans les trois conditions de bande dérasée (sans bande dérasée = -5 ± 25 cm ; 0,75 = -9 ± 29 cm ; 1,25 = -11 ± 26 cm), alors que LP_{Apex} était significativement plus importante dans les virages à droite en présence (0.75 m = 66 ± 29 cm ; 1.25 m = 70 ± 28 cm) qu'en absence de bande dérasée (46 ± 22 cm). Là encore, les positions latérales adoptées par les participants dans les virages à gauche et à droite se distinguaient significativement pour chaque condition de bande dérasée.

LP_{Max}

Les résultats de l'ANOVA pour la variable LP_{Max} étaient strictement identiques à ceux de la variable LP_{Apex}, avec des effets principaux significatifs pour la largeur de la voie ($F_{1,14} = 55.82$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .80$), la largeur de la bande dérasée ($F_{2,28} = 10.68$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .43$), la direction du virage ($F_{1,14} = 53.79$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .79$), et une interaction significative bande dérasée \times direction ($F_{2,28} = 17.05$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .55$). L'effet principal de la largeur de la voie a révélé une déviation latérale vers le bord intérieur significativement plus importante dans la voie de 3,50 m (68 ± 46 cm) que dans la voie de 2,75 m (52 ± 46 cm). L'interaction bande dérasée \times direction a révélé que les participants ont adopté une déviation latérale similaire dans les virages à gauche entre les trois conditions de bande dérasée

(sans bande dérasée = 27 ± 29 cm ; 0.75 m = 24 ± 28 cm ; 1.25 m = 22 ± 28 cm), alors qu'ils roulaient significativement plus près du bord intérieur de la voie en présence (0.75 m = 102 ± 34 cm ; 1.25 m = 104 ± 31 cm) qu'en absence de bande dérasée (81 ± 23 cm) dans les virages à droite. Là encore, les positions latérales adoptées par les participants dans les virages à gauche et à droite se distinguaient significativement pour chaque condition de bande dérasée.

Temps passé hors de la voie

Enfin, le temps passé hors de la voie était significativement supérieur dans la voie 2.75 m ($F_{1,14} = 40.91$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .75$), dans les virages à droite ($F_{1,14} = 30.05$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .68$), et en présence de bande dérasée ($F_{1,14} = 20.61$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .60$). L'interaction largeur de voie \times direction était également significative ($F_{1,14} = 38.05$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .73$), indiquant un temps passé hors de la voie significativement plus important dans les virages à droite sur la voie 2.75 m ($45,2 \pm 31,6\%$) que dans les trois autres conditions expérimentales (2.75 m, gauche = $1,3 \pm 3,3\%$; 3.50 m, gauche = $0,2 \pm 0,6\%$; 3.50 m, droite = $23,2 \pm 24,8\%$). L'interaction bande dérasée \times direction était également significative ($F_{2,28} = 19.18$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .58$) et a indiqué que le temps passé hors de la voie dans les virages à gauche était similaire dans les trois conditions de bande dérasée (sans bande dérasée = $1,0 \pm 3,0\%$; 0.75 m = $1,0 \pm 2,8\%$; 1.25 m = $0,4 \pm 1,1\%$), mais était significativement supérieur en présence (0.75 m = $40,7 \pm 31,0\%$; 1.25 m = $41,2 \pm 30,9\%$) qu'en absence ($20,7.X \pm 25,1\%$) de bande dérasée dans les virages à droite.

4. Discussion

La présente étude a été menée afin de déterminer si l'installation de bandes dérasées sur les routes rurales bidirectionnelles influence le contrôle latéral dans les virages, en l'absence et en présence de trafic venant en sens inverse. Contrairement aux études précédentes qui ont traité cette question (Bella, 2013 ; Ben-Bassat & Shinar, 2011), le contrôle latéral a été ici examiné (i) à différents points de mesure avant et le long des virages plutôt que par une seule valeur moyenne décrivant la position latérale pour l'ensemble de la courbe, et (ii) avec un plan factoriel permettant d'étudier l'effet propre de la direction du virage. Les résultats collectés au travers de cette expérimentation ont indiqué que la présence et la largeur de l'accotement ne modifiaient pas (ou marginalement) la vitesse de conduite, mais affectaient très nettement les stratégies de positionnement latéral dans la voie dans les deux conditions de trafic.

4.1. Vitesse

En l'absence de trafic, les participants ont agi sur le contrôle latéral en maintenant leur vitesse inchangée entre les différentes configurations routières. Bien que ce résultat ne confirme pas les conclusions antérieures montrant que des voies plus larges entraînent des vitesses plus élevées dans les virages (Godley et al., 2004 ; Lewis-Evans & Charlton, 2006), il convient de mentionner que la relation entre la vitesse et la largeur des voies n'est pas totalement claire dans la littérature. En effet, certaines études sur routes rurales en ligne droite n'ont pas fait état de variations de vitesse en fonction de la largeur de la voie (Lum, 1984 ; Mecheri et al., 2017 ; Rosey et al., 2009), tandis que d'autres ont démontré que les voies les plus larges produisent des vitesses plus élevées (De Waard et al., 1995 ; Godley et al., 2004 ; Lewis-Evans & Charlton, 2006). Une explication possible de cette disparité de résultats tient à la possibilité pour les participants de disposer ou non d'un retour d'informations quant à la vitesse à laquelle ils roulent. En effet, toutes les études qui n'ont pas montré d'effets de la largeur de voie sur la vitesse pratiquée en section droite ont permis aux participants d'accéder au compteur de vitesse (Lum, 1984 ; Mecheri et al., 2017 ; Rosey et al., 2009), tandis que certaines des études (mais pas toutes) qui ont rapporté un effet de la largeur de la voie sur la vitesse de conduite n'ont pas permis aux participants d'accéder à ce compteur (Ben-Bassat & Shinar, 2011 ; Godley et al., 2004). En outre, certaines études ont mis en évidence un modèle d'adaptation asymétrique de la vitesse à la largeur de voie : par comparaison à une voie de largeur

contrôle, il était observé que la vitesse diminuait sur une voie plus étroite, mais qu'elle n'augmentait pas sur une voie plus large (Godley et al., 2004 ; Lewis-Evans et Charlton, 2006). La littérature ne fait donc pas état de changements systématiques de la vitesse en fonction de la largeur de la voie, ce qui ne permet pas de tirer de conclusions claires quant aux effets de la largeur de la voie sur la vitesse de conduite.

En ce qui concerne l'effet de la bande dérasée, l'absence de différences significatives entre les conditions 0.75 m et 1.25 m a confirmé les résultats obtenus par Ben-Bassat et Shinar (2011) en l'absence de glissière de sécurité. Étant donné que les participants n'ont pas roulé près de la limitation de vitesse, ce résultat ne tient probablement pas à un effet plafond, ce qui renforce le niveau de preuves indiquant que l'élargissement d'une bande dérasée déjà existante n'augmente pas nécessairement les vitesses pratiquées. En revanche, du point de vue de l'application d'une bande dérasée sur une route qui n'en était pas équipée (absence vs. présence), nos résultats s'inscrivent en contradiction avec ceux obtenus par Bella (2013) indiquant des vitesses plus élevées en présence de bandes dérasées. Dans l'étude de Bella (2013), les bandes dérasées étaient d'une largeur de 0.50 m, ce qui exclut l'idée selon laquelle des bandes dérasées plus larges, dans la présente étude, auraient eu un effet significatif sur les vitesses pratiquées. Par conséquent, puisque les données disponibles sur cette question sont très peu nombreuses, ce résultat est surprenant et difficile à interpréter. De nouvelles expérimentations sont donc nécessaires pour mieux comprendre la relation entre la présence d'une bande dérasée et la vitesse pratiquée dans les virages lorsque les participants sont seuls sur l'infrastructure.

En présence de trafic, la vitesse de conduite était significativement plus élevée, de 2 km/h, sur le profil en travers le plus large ([3,50, 1,25]) en comparaison du plus étroit ([2,75, 0]). Puisque les effets principaux de la largeur de la voie et de la bande dérasée n'étaient pas significatifs, cet effet n'est pas attribuable à un élargissement isolé de la voie ou de la bande dérasée, mais à la mise à disposition concomitante aux conducteurs d'une large voie de circulation et d'une zone de récupération. Cet effet du profil en travers sur la vitesse est sans doute expliqué par le fait que les participants ont roulé plus près du marquage de rive en présence de trafic, en particulier sur la route la plus étroite où la proximité avec la limite de la voie était renforcée par les dimensions de la voie elle-même (i.e., indépendamment de la stratégie de positionnement des participants). Une autre différence importante entre la route la plus large et la plus étroite était que le marquage de rive coïncidait avec le bord de la route sur la route la plus étroite. Les conditions de conduite proposées par cette route ont donc probablement conduit les participants à prêter une plus grande attention à la compensation des déviations latérales pour éviter de laisser le véhicule dévier vers le marquage de rive et risquer ainsi une sortie de route. Dans cette perspective, il est possible d'imaginer que les participants n'ont pas pu fournir cet effort additionnel de contrôle sans une réaction compensatoire consistant à ralentir leur vitesse. Mais il est également possible de considérer que les participants n'étaient pas disposés à fournir l'attention supplémentaire nécessaire pour contrôler latéralement le véhicule à la même vitesse que sur la route la plus large simplement pour des raisons de confort.

4.2. Contrôle latéral et largeur de voie

L'analyse de la position latérale en absence de trafic a montré que le contrôle de la direction était largement influencé par la largeur de la voie, mais de manière distincte en fonction de la direction du virage. À l'approche, les participants ont davantage dévié vers l'extérieur dans la voie de 3,50 m que dans la voie de 2,75 m dans les virages à droite mais pas dans les virages à gauche. Dans les virages (i.e., à l'apex et pour la LP_{Max}), un pattern de résultats opposé a été observé, les participants ayant nettement plus dévié vers l'intérieur dans la voie de 3,50 m que dans la voie de 2,75 m dans les virages à gauche mais pas dans les virages à droite. Les participants ont donc adapté leur déviation latérale en fonction de la largeur de la voie seulement lorsque la direction du déplacement impliquait une déviation vers la ligne axiale (à l'approche des virages à droite mais pas à gauche, et à l'intérieur des virages à gauche mais pas à droite). Une plus grande déviation latérale dans la voie de 3.50 m

était attendue car elle offre un plus grand espace qui permet d'adopter une approche plus excentrée des virages à gauche et de couper les virages à droite de manière plus prononcée. Il est toutefois frappant de constater que cette adaptation de la déviation latérale à la largeur de la voie cessait d'être mise en œuvre lorsque la direction du déplacement impliquait une déviation vers la bande dérasée (à l'approche des virages à gauche et à l'intérieur des virages à droite), car les participants ont adopté une déviation latérale dans la voie de 2,75 m aussi prononcée que dans la voie de 3,50 m. Ce faisant, les participants ont clairement contourné les contraintes spatiales latérales imposées par la largeur de la voie. Bien que l'interaction entre la largeur de la voie et la bande dérasée sur les variables de position latérale n'était pas significative, il semble raisonnable de considérer que ce comportement tient à la prise en compte, chez les participants, de la présence de la bande dérasée dans la tâche de conduite. En effet, outre les résultats relatifs au temps passé hors de la voie qui corroborent l'hypothèse selon laquelle le même niveau de déviation latérale entre les deux voies dans les virages à droite a été rendu possible par l'occupation de la bande dérasée, cette hypothèse est aussi étayée par des analyses statistiques supplémentaires qui ont utilisé un plan factoriel à mesures répétées séparé pour chaque direction de virage. Au plan applicatif, ce résultat est d'une importance cruciale car il montre que la réduction d'une voie de circulation qui serait opérée via une redistribution du profil en travers (i.e., réduction de la largeur de voie au profit d'une augmentation concomitante de la largeur de la bande dérasée par manipulation du marquage au sol) produit des effets sur le comportement de conduite en virage qui ne peuvent être prédits à partir des résultats observés dans le cadre d'une réduction physique de la voie (i.e., réduction du profil en travers de la route). Il a en effet été démontré que les conducteurs restent plus proches du centre de la voie lorsqu'ils négocient des virages sur des voies plus étroites, et qu'ils « coupent » en conséquence de façon bien moindre les virages sur les voies plus étroites (Raw et al., 2012 ; Robertshaw & Wilkie, 2008).

En présence de trafic, la largeur de la voie a également eu un impact majeur sur le positionnement latéral des conducteurs, mais ses effets se sont exprimés de manière similaire quelle que fut la direction du déplacement. Dans la voie la plus large, les participants ont augmenté leur déviation latérale vers le bord extérieur de la voie lorsqu'ils approchaient des virages dans les deux directions. Ils ont également augmenté leur déviation latérale vers le bord intérieur de la voie lorsqu'ils coupaient les virages dans les deux directions. La raison pour laquelle les participants ont calibré leur déviation latérale à la largeur de la voie dans les deux directions tient probablement à la façon dont ils se sont positionnés en présence de trafic. En effet, la présence de trafic dans la voie opposée a entraîné un écart important du véhicule par rapport à la ligne axiale (i.e., centre de la route), rapprochant ainsi nettement les conducteurs du bord extérieur de la voie. Ce positionnement a probablement permis aux participants de maintenir leur stratégie générale de négociation de virages dans les virages à gauche. En effet, dans les virages à gauche, la distance importante séparant le véhicule des participants de la ligne axiale leur a permis d'utiliser l'espace de manœuvre plus important offert par la voie la plus large pour couper le virage de manière plus prononcée dans la voie de 3.50 m que dans la voie de 2.75 m, sans pour autant augmenter (et voire même réduire, du fait d'une LP_{Max} inférieure à celle observée en absence de trafic) le risque de collision frontale.

Dans les virages à droite, la distance importante séparant le véhicule et la ligne axiale a mené les participants à se positionner dans la demi-voie intérieure avant même l'entrée dans la courbe. Un tel positionnement durant l'approche est certainement la raison expliquant que la déviation latérale a été plus réduite sur la voie la plus étroite en présence de trafic. En effet, bien que les participants ont maintenu une stratégie consistant à couper les virages à droite en présence de trafic (i.e., en augmentant la déviation latérale vers le bord intérieur de la voie progressivement tout au long de la courbe), cette stratégie les a conduit à se retrouver progressivement avec très peu d'espace les séparant du marquage de rive, et à rouler dans la bande dérasée pour une partie substantielle de la section courbe (45 % de temps passé hors de la voie dans la voie de 2.75 m dans les virages à droite). Ainsi, la très faible marge de manœuvre dont on dispose les participants pour gérer leur déviation

latérale par rapport à la limite de la voie, inhérente à leur stratégie de positionnement en présence de trafic, explique certainement pourquoi ils n'ont pas coupé les virages à droite de manière aussi prononcée dans la voie de 2.75 m que dans la voie de 3.50 m.

4.3. Contrôle latéral et largeur de bande dérasée

La bande dérasée a eu une influence majeure sur le contrôle latéral des participants qui a été conforme à nos prédictions. A l'approche, les participants ont adopté une plus grande déviation latérale vers le bord extérieur de la voie en présence d'une bande dérasée dans les virages à gauche (quand le bord extérieur de la voie se trouvait du côté de la bande dérasée) mais pas dans les virages à droite (quand le bord extérieur de la voie se trouve du côté de la ligne axiale). Dans le virage (i.e., LP_{Apex} et LP_{Max}), les participants ont davantage dévié vers le bord intérieur de la voie en présence d'une bande dérasée dans les virages à droite mais pas dans les virages à gauche. Cet effet d'interaction entre la bande dérasée et la direction du virage montrant une influence distincte de la bande dérasée sur le contrôle latéral en fonction de la direction du virage était particulièrement robuste puisqu'il s'est appliqué de la même manière en absence et en présence de trafic, excepté à l'entrée du virage où de subtiles différences ont été observées. A l'entrée des virages à gauche, les participants ont adopté le même positionnement latéral entre les trois conditions de bande dérasée en absence de trafic, alors que les positions latérales d'entrée se distinguaient toutes significativement entre les conditions de bande dérasée en présence de trafic. A l'entrée des virages à droite, les participants ont adopté une plus grande déviation latérale en présence de bande dérasée dans les deux conditions de trafic, mais cette augmentation de la déviation latérale ne s'est produit que pour la bande dérasée la plus large (1.25 m) en absence de trafic. Au-delà de ces quelques différences, les trajectoires empruntées par les participants sous l'effet de la présence d'une bande dérasée ont entraîné une augmentation significative du temps passé hors de la voie en présence de trafic. Ce résultat implique que les trajectoires de conduite plus excentrées prises par les participants dans les virages à droite en présence de bande dérasée n'étaient pas adaptées à la largeur de la voie et ont entraîné des erreurs de conduite qui les ont menés à conduire sur la bande dérasée.

5. Conclusion

En conclusion, les résultats de la présente étude ont montré que l'aménagement d'une bande dérasée sur une route rurale bidirectionnelle a des effets importants sur les stratégies de positionnement latéral et que ceux-ci sont clairement dépendants de la direction du virage. Dès lors que la négociation du virage impliquait de dévier vers la droite (à l'approche des virages à gauche mais pas à droite, et à l'intérieur des virages à droite mais pas à gauche), les participants ont augmenté de façon significative leur déviation latérale par rapport au centre de la voie en présence d'une bande dérasée. Ces résultats montrent ainsi clairement, contrairement à ce qui a été envisagé antérieurement dans la littérature (Bella, 2013 ; Ben-Bassat & Shinar, 2011), que les effets induits par la bande dérasée sur le contrôle latéral en virage s'appliquent distinctement aux virages à gauche et à droite. De manière importante, les stratégies de positionnement latéral mises en œuvre par les participants en présence de bande dérasée étaient porteuses d'effets négatifs puisqu'elles ont entraîné une augmentation significative du temps passé en dehors de la voie, notamment en présence de trafic. En plus de placer les participants dans une situation inappropriée (puisque la bande dérasée n'est pas un espace roulable), le fait que les participants se retrouvent à conduire davantage sur la bande dérasée peut aussi potentiellement produire des effets délétères sur la sécurité des cyclistes circulant sur l'accotement.

Les résultats de la présente étude ouvrent vers des perspectives explicatives qu'il convient de poursuivre si l'on souhaite comprendre la cause de la modification du contrôle de trajectoire en présence de bande dérasée. Au regard des fortes influences réciproques existantes entre la direction

du regard et la trajectoire locomotrice dans les virages (Wann & Wilkie, 2004), l'hypothèse selon laquelle les trajectoires locomotrices observées sous l'effet de la présence d'une bande dérasée dans les virages à droite ont pour origine une altération de la stratégie visuelle sous-jacente au contrôle de la trajectoire est plausible et mérite d'être mise à examen. La prochaine étude a été menée pour répondre à cette question.

Points à retenir

- L'analyse des positions latérales aux différents points de mesure dans le virage confirme l'intérêt de ce découpage pour appréhender finement les comportements de conduite en courbe. Cette analyse permet, en premier lieu, de confirmer que les conducteurs coupent le virage, quelle que soit sa direction.
- Conformément à la principale hypothèse posée, la présence d'une bande dérasée sur route rurale a des effets différenciés selon la direction du virage.
- Dans les virages à gauche, la présence d'une bande dérasée influence les stratégies de positionnement durant l'approche (i.e., 25 m avant l'entrée) : la déviation latérale est significativement plus importante vers le bord extérieur en présence qu'en l'absence d'une bande dérasée.
- Dans les virages à droite, la présence d'une bande dérasée influence les stratégies de positionnement dans le virage (apex et déviation latérale maximale) : la position latérale est significativement plus proche du bord intérieur de la voie en présence qu'en absence de bande dérasée.
- Cette stratégie particulière dans les virages à droite en présence d'une bande dérasée entraîne une augmentation significative du temps pendant lequel les participants circulent au-delà du marquage de rive.
- Cet effet différencié de la bande dérasée selon la direction du virage s'est appliqué de la même manière en absence et en présence de trafic.

IV. Etude 3. Effet de la présence d'une bande dérasée en virage sur le contrôle visuo-locomoteur

1. Introduction

Le contrôle visuel des déplacements en trajectoire courbe est d'une importance cruciale dans la conduite automobile au regard des risques inhérents à la conduite à haute vitesse dans les virages. Dans la deuxième étude du présent livrable, il a été montré que les participants augmentent de façon significative leur déviation vers le bord intérieur du virage lorsqu'ils négocient des virages à droite en présence d'une bande dérasée. Les trajectoires induites par la présence d'une bande dérasée dans les virages à droite n'étaient pas adaptées à la largeur de voie au sens où elles produisaient une augmentation significative du temps passé hors de la voie. Dans cette étude, ainsi que dans celles ayant été réalisées antérieurement sur cette question (Bella, 2013 ; Ben-Bassat & Shinar, 2011), la capture des processus de contrôle latéral décrivant le comportement de conduite a été réalisée indépendamment des processus de contrôle visuel de la trajectoire. Si la seule analyse des stratégies de positionnement latéral était adaptée aux buts poursuivis par ces études, elle ne permet cependant pas de déterminer les raisons qui pourraient être à l'origine de la transformation des trajectoires dans les virages à droite en présence de bande dérasée. En particulier, les données collectées dans ces études ne permettent pas de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse selon laquelle les trajectoires produites sous l'effet d'une bande dérasée dans les virages à droite ont une origine visuelle, hypothèse dont on sait qu'elle est plausible au regard de la relation entretenue entre la direction du regard et la locomotion en courbe en conduite automobile.

Un corpus de travaux important a porté sur le contrôle visuel sous-jacent à la tâche de conduite en virage. L'objectif de ces travaux était d'identifier les informations visuelles sur lesquelles s'appuie le système visuo-moteur pour contrôler un déplacement en trajectoire courbe et de comprendre comment ces informations peuvent être traduites en un input pour le système moteur. L'un des modèles les plus influents a été proposé par Land et Lee (1994), qui ont établi que le regard le long d'une route sinueuse est dirigé environ 80% du temps autour du point tangent de la courbe (voir également Kandil et al., 2009). Comme l'angle visuel formé entre la direction du cap instantané du véhicule et la direction du point tangent reflète par relation géométrique le rayon de courbure d'un virage, il a été suggéré que l'action de fixer le point tangent permet le prélèvement de cet angle visuel qui est directement lié à l'action motrice devant être produite pour négocier le virage (angle au volant). Il a donc été proposé que la fonction d'un regard dirigé sur le point tangent est de fournir des informations concernant la géométrie de la courbe permettant la planification et le contrôle de la trajectoire dans le virage (Land & Lee 1994 ; Land & Horwood 1995). D'autres travaux ont questionné le modèle du point tangent et ont proposé le modèle dit du « *future path* » basé sur l'hypothèse que les conducteurs repèrent des points cibles sur la route vers lesquels ils souhaitent diriger leur trajectoire (Wann & Land, 2002 ; Wilkie & Wann, 2003). Dans cette logique, des travaux plus récents ont avancé la théorie dite du regard actif (*active gaze theory*) selon laquelle les conducteurs regardent où ils veulent aller, envisageant ainsi le point tangent comme un point sur la trajectoire future qui ne représente pas nécessairement la variable d'intérêt du système visuel pour négocier une courbe (Wilkie et al., 2008). Quel que soit le modèle considéré, la relation très forte qui est formalisée par ces travaux entre la direction du regard et les trajectoires locomotrices nous mène à considérer l'hypothèse selon laquelle l'aménagement d'une bande dérasée dans les virages à droite produit une altération de la façon dont les conducteurs échantillonnent visuellement la scène routière.

Dans ce cadre, l'objectif de la présente étude était de comparer les stratégies visuo-locomotrices en l'absence et en présence de bande dérasée dans les virages à droite sur les routes bidirectionnelles. Conformément à la méthode employée dans la deuxième étude du présent livrable, la position

latérale relative au centre de la voie a été mesurée à différents points dans le virage. Les stratégies visuelles des participants ont également été enregistrées à l'aide d'un oculomètre. Pour caractériser la direction du regard des participants dans le virage, la position du point tangent a été utilisée comme référence dans l'environnement et la déviation angulaire du regard par rapport à ce point a été utilisée comme variable d'analyse du comportement visuel. Au plan des trajectoires locomotrices, en lien avec les résultats de la deuxième étude du présent livrable, il était attendu que la présence de la bande dérasée entraîne une plus grande déviation latérale du véhicule vers le bord intérieur du virage. Cette hypothèse a été testée en manipulant, comme précédemment, la largeur de la voie (2,75 et 3,50 m). Au plan du contrôle visuel, considérant que la direction du regard sous-tend la planification et le contrôle des trajectoires locomotrices dans les virages, il était attendu que la présence de la bande dérasée modifie la direction du regard des participants en augmentant la distance angulaire au point tangent vers la droite.

2. Méthode

2.1. Participants

Dix-huit participants (âge moyen : 36 ± 10 ans), ayant tous une vision normale ou corrigée, ont été recrutés pour cette expérimentation qui était approuvée par le comité d'éthique local. Les participants avaient leur permis de conduire depuis au moins deux ans et avaient au moins 20 000 km d'expérience de conduite. Tous les participants ont donné leur consentement éclairé avant d'être inclus dans l'étude et étaient naïfs quant aux hypothèses expérimentales.

2.2. Dispositif expérimental

Simulateur de conduite

L'expérimentation a été menée à l'aide d'un simulateur de conduite à bas coût composé d'un volant à retour de force, de pédales et d'une boîte de vitesses (Logitech G25) montés sur un siège de voiture. En lien avec les résultats issus de la première étude du présent livrable, une cabine complète virtuelle représentant le gabarit du véhicule à l'échelle 1 a été utilisée afin de capturer de façon effective les stratégies de contrôle latéral des participants (largeur du véhicule simulé = 1.60 m, rétroviseurs exclus). L'environnement visuel était affiché sur trois écrans de 1,22 m de large et 0,70 m de haut (fréquence de rafraîchissement de 60 Hz, avec une résolution de 3840×2160 pixels). La distance entre la tête des participants et le centre de chaque écran était de 1,05 m. Dans cette configuration, l'angle visuel formé par les trois écrans était de 180° horizontalement et de 37° verticalement. Trois haut-parleurs ont généré des bruits moteur et environnementaux réalistes pour améliorer l'expérience du conducteur. Les données ont été recueillies à une fréquence d'échantillonnage de 60 Hz et comprenaient des informations sur le comportement du conducteur (actions sur le volant et les pédales) et le véhicule simulé (position). La vitesse de conduite était contrôlée par le simulateur (vitesse constante de 90 km/h).

Oculomètre

Un oculomètre monoculaire de la marque Pertech a été utilisé pour enregistrer les mouvements oculaires (modèle tête portée). Cet oculomètre, basé sur le principe d'une paire de lunette (dans sa structure), a une fréquence d'enregistrement de 50 Hz et une précision 0.25° . Il utilise une technologie de suivi de la pupille (et non de reflet cornéen, ce qui présente l'avantage de n'avoir aucun "miroir" présent dans le champ de vision de l'utilisateur). Une calibration en 7 points a été utilisée avant tout enregistrement. Les données de suivi des mouvements de tête ont également été enregistrées avec le logiciel EyeTechMotion, avec un ensemble de marqueurs actifs placé en périphérie de l'écran du simulateur.

Synchronisation des systèmes

Les données issues du simulateur de conduite et de l'oculomètre ont été synchronisées au moyen du logiciel EyeTechPilot via un protocole TCP/IP, avec le logiciel de simulation comme serveur TCP/IP (envoi de données simulateur dans une seule trame) et le logiciel de l'oculomètre EyeTechPilot comme client TCP/IP (réception d'une trame de données et ajout de ces données au fichier de sortie EyeTechPilot).

Bases visuelles 3D

La route expérimentale était une route rurale bidirectionnelle de rase campagne comprenant des virages d'un rayon de courbure et d'une longueur de 200 m, mesurée à partir du centre de la route. La surface de la route était texturée et marquée sur les bords par une ligne discontinue de 0,18 m de largeur sur les bords et de 0,15 m au centre. Pour cette expérimentation, le terrain environnant correspondait à un environnement rural de rase campagne sans aucun arbre ni bâtiment.

2.3. Conditions expérimentales

Les participants ont conduit sur un total de 6 routes rurales expérimentales (voir Figure 11) correspondant à deux largeurs de voies (3,50 et 2,75 m) et trois largeurs de bande dérasée (0, 0,75 et 1,25 m) différentes. Les largeurs de voie ont été déterminées sur la base des recommandations pour la conception routière en France (c'est-à-dire 3,50 m ; voir Hall et al., 1998). La largeur des bandes dérasées a été déterminée en s'appuyant sur la réglementation française pour les accotements jugés appropriés pour la pratique cycliste sur les routes rurales, avec les largeurs 0,75 m et 1,25 m correspondant respectivement aux largeurs minimales et recommandées. Le marquage de rive n'était pas inclus dans la largeur de la voie ou de la bande dérasée. Aucun véhicule n'était présent dans l'environnement routier tout au long de cette expérimentation (ni dans la voie du participant, ni dans la voie opposée).

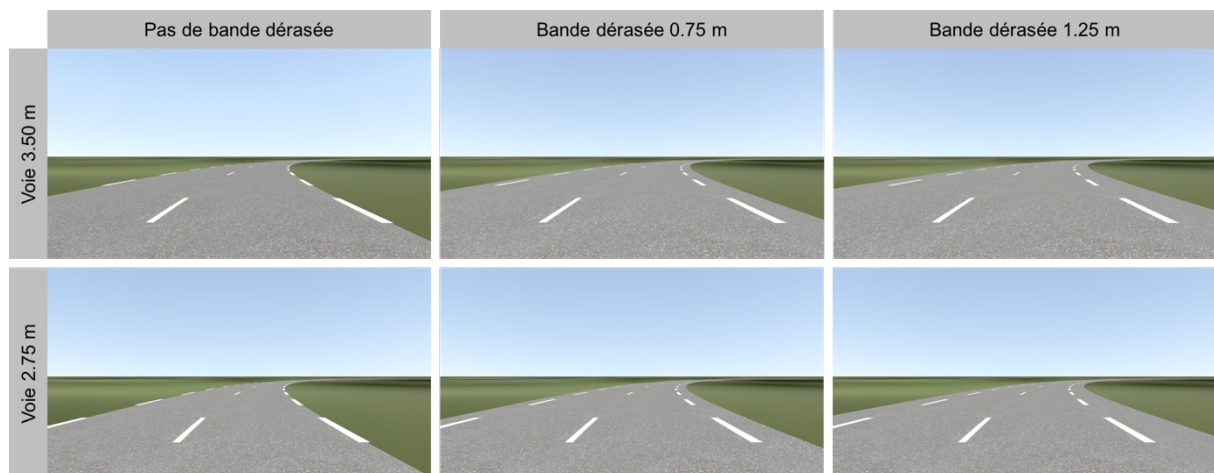


Figure 11. Illustration des six routes expérimentales, correspondant à deux largeurs de voie (2.75 et 3.50 m) et trois largeurs de bande dérasée (0, 0.75 et 1.25 m).

2.4. Procédure

Contrairement aux autres études réalisées dans ce projet, les participants n'ont pas conduit de façon ininterrompue le long des différentes routes proposées mais ont été confrontés à une série d'essais présentant chacun un virage. Au début d'un essai, les participants étaient propulsés 100 m avant l'entrée dans la courbe avec une vitesse initiale de 90 km/h. La vitesse de conduite était contrôlée par le simulateur et était constante tout au long de l'essai. La fin d'un essai était marquée par l'affichage d'un écran noir et survenait lorsque le véhicule du participant arrivait à la fin de la courbe. Pour chaque route expérimentale, les participants ont été confrontés à un bloc de huit essais, soit 8

virages à droite. Avant d'effectuer les essais expérimentaux, les participants ont effectué un bloc de six essais pour se familiariser avec la tâche. Les participants ont conduit sur chacune des 6 routes dans un ordre contrebalancé.

2.5. Variables dépendantes et analyse statistique

Le comportement de conduite a été analysé au travers de la position latérale du véhicule dans la voie et de la direction du regard relativement au point tangent.

La position latérale du véhicule a été définie comme la distance en centimètres séparant le centre du véhicule du participant et le centre de sa voie de circulation (ou déviation latérale). Les valeurs positives correspondaient à une déviation vers le bord intérieur du virage et les valeurs négatives correspondaient à une déviation vers le bord extérieur du virage. Trois variables relatives à la position latérale ont été calculées : la position latérale à l'entrée du virage ($LP_{\text{Entrée}}$), la position latérale à l'apex (LP_{Apex}) et la position latérale maximale (LP_{Max}). $LP_{\text{Entrée}}$ correspondait à la position latérale instantanée au moment d'entrer dans le virage (i.e., à 0 m dans la courbe). LP_{Apex} correspondait à la position latérale instantanée lorsque le conducteur atteignait l'apex de la courbe (i.e., à 100 m dans le virage). LP_{Max} correspondait à la position la plus proche du bord intérieur du virage tout au long de la courbe.

La direction du regard a été exprimée comme la déviation angulaire horizontale de chaque point de regard relativement au point tangent. Pour ce faire, la position du point tangent dans l'environnement routier (coordonnées x et y dans l'image du simulateur) a été calculée à chaque pas de temps. Les coordonnées de direction de regard, initialement enregistrées en coordonnées (x, y) dans l'image de la caméra de scène de l'oculomètre, ont été ensuite exprimées au moyen d'une matrice de transformation en coordonnées (x, y) dans l'image du simulateur. Il a ainsi été possible d'obtenir les coordonnées (x, y) de la position du point tangent et du point de regard dans le même référentiel (l'image du simulateur). Avec la position du point tangent comme origine, l'analyse a porté sur la distribution des déviations angulaires horizontales du point de regard pour l'ensemble de la courbe (de -10 à +10°, avec un pas de 1°, voir Figure 12). Les déviations angulaires positives correspondaient à des directions de regard situées à droite du point tangent (en dehors de la voie de circulation) et les déviations angulaires négatives correspondaient à des directions de regard situées à gauche du point tangent (situées dans la voie de circulation).

Les données de position latérale du véhicule ont été analysées à l'aide d'ANOVAs à mesure répétées selon le plan factoriel suivant : 2 (Largeur de Voie : 2.75, 3.50 m) x 3 (Largeur de la bande dérasée : 0, 0.75, 1.25 m). Les données de déviation angulaire des points de regard ont été analysées à l'aide d'ANOVAs à mesure répétées selon le plan factoriel suivant : 2 (Largeur de Voie : 2.75, 3.50 m) x 3 (Largeur de la bande dérasée : 0, 0.75, 1.25 m) x 22 (catégorie de déviation angulaire). Les traitements statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel Statistica (StatSoft Inc, USA). Le seuil de significativité était fixé à .05. Le test de sphéricité de Mauchly a été utilisé pour déterminer si l'hypothèse de sphéricité était violée. En cas de violation, une correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée pour ajuster les degrés de liberté et analyser les effets. Les comparaisons a posteriori ont été réalisées à l'aide du test de Tukey (HSD). Pour chaque effet, l'éta-carré partiel (η_p^2) a été calculé pour déterminer la proportion de variance totale de la variable dépendante qui est expliquée par la variable indépendante. Les statistiques descriptives ont été reportées avec moyennes et écarts-types (moyenne \pm EC).

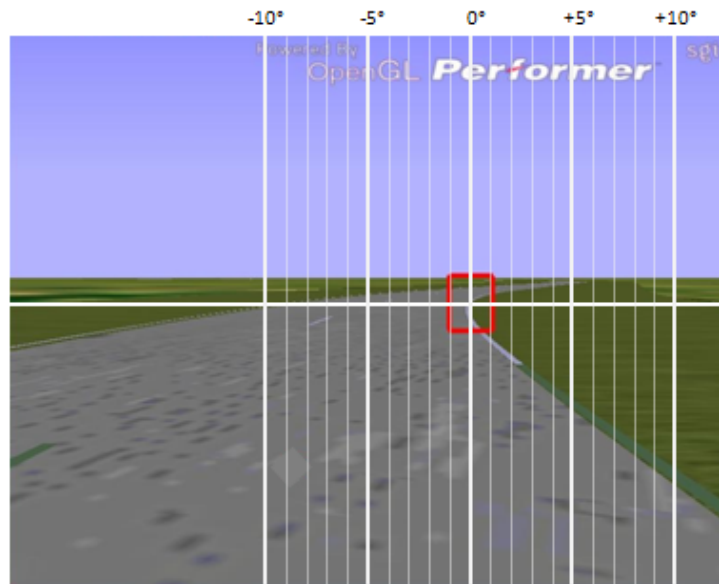


Figure 12. Illustration des catégories de déviation angulaire au point tangent utilisées pour caractériser le contrôle visuel des participants.

3. Résultats

3.1. Position latérale du véhicule

La Figure 13 représente la position latérale adoptée par les participants dans les virages à droite dans les trois conditions de bande dérasée pour les deux largeurs de voie.

$LP_{\text{Entrée}}$

L'ANOVA pour $LP_{\text{Entrée}}$ a indiqué un effet principal significatif de la largeur de la bande dérasée ($F_{2,34} = 4.22$, $p = .023$, $\eta_p^2 = .20$). Aucun autre effet principal ou d'interaction n'a été observé. Les participants ont adopté une déviation latérale significativement plus proche du bord intérieur de la voie en présence (0.75 m = 5 ± 28 cm; 1.25 m = 6 ± 29 cm) qu'en absence de bande dérasée (-5 ± 31 cm)

LP_{Apex}

L'ANOVA pour LP_{Apex} a indiqué un effet principal significatif de la largeur de la bande dérasée ($F_{1,35,22.89} = 5.70$, $p = .018$, $\eta_p^2 = .25$), montrant une plus grande déviation latérale vers le bord intérieur du virage en présence (0.75 m = 9 ± 29 cm; 1.25 m = 11 ± 34 cm) qu'en absence de bande dérasée (0 ± 30 cm). Aucun autre effet principal ou d'interaction n'a été observé.

LP_{Max}

Concernant la déviation latérale maximale dans le virage, l'ANOVA a révélé des effets principaux significatif de la largeur de voie ($F_{1,17} = 7.76$, $p = .013$, $\eta_p^2 = .31$) et de la largeur de la bande dérasée ($F_{1,43,24.33} = 4.22$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .42$). Aucun effet d'interaction n'a été observé. Concernant la largeur de voie, la déviation latérale adoptée par les participants était significativement plus importante dans la voie de 3.50 (48 ± 30 cm) que dans la voie de 2.75 m (40 ± 26 cm). Concernant la largeur de la bande dérasée, la déviation latérale était significativement plus importante en présence (0.75 m = 48 ± 27 cm; 1.25 m = 49 ± 28 cm) qu'en absence de bande dérasée (34 ± 27 cm).

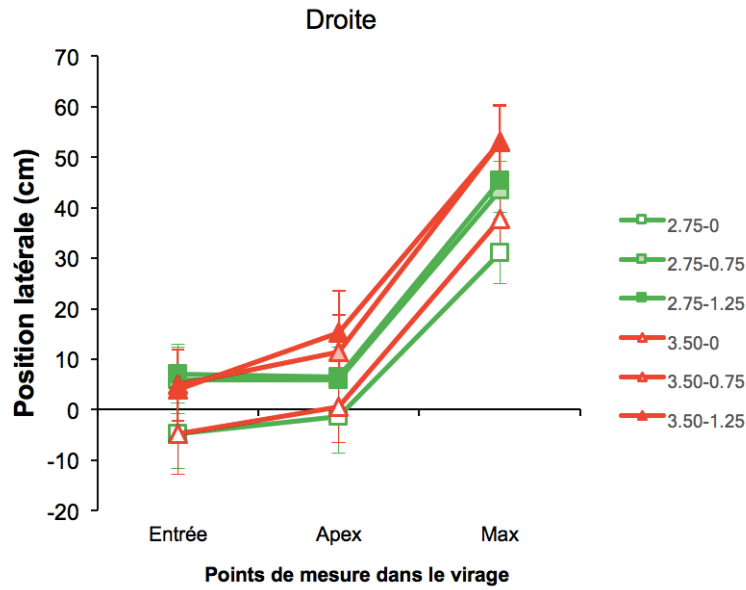


Figure 13. Position latérale moyenne aux différents points de mesure en fonction de la largeur de la voie et de la largeur de la bande dérasée dans les virages à droite. Le zéro représente le centre de la voie. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

3.2. Déviation angulaire des points de regard

La Figure 14 représente la proportion de directions dans chacune catégorie de déviation angulaire au point tangent considérée en fonction de la largeur de la bande dérasée dans les virages à droite. En raison de difficultés rencontrées lors de l'acquisition des données oculométriques, les données d'un participant n'ont pu être conservées. Les analyses statistiques sur les données oculométriques ont donc été réalisées sur un échantillon de 17 participants.

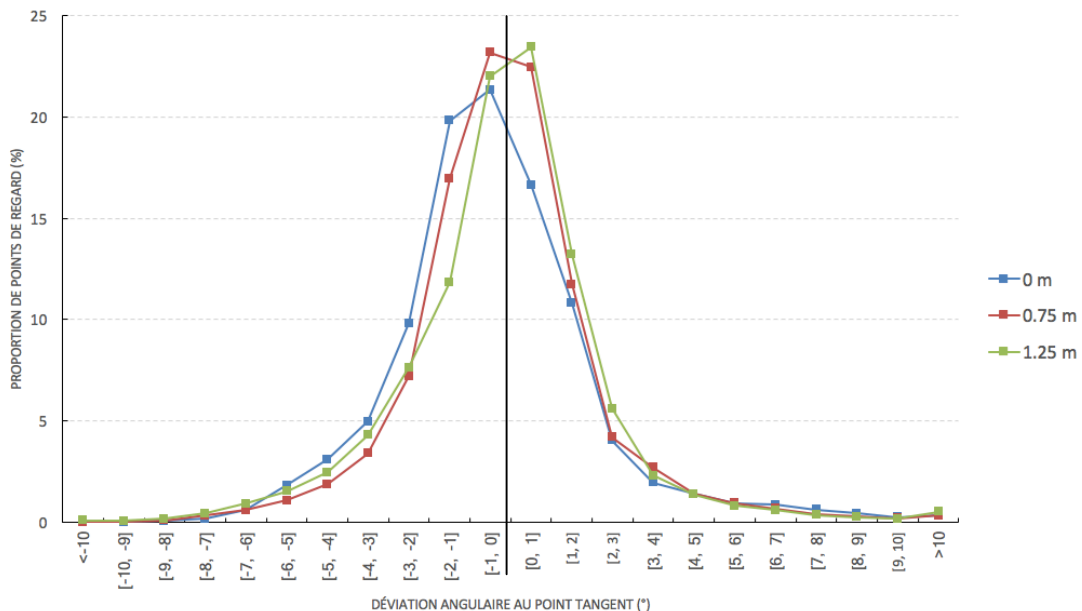


Figure 14. Proportion de directions de regard par catégorie de déviation angulaire au point tangent en fonction de la condition de bande dérasée dans les virages à droite.

L'ANOVA pour la déviation angulaire horizontale au point tangent a indiqué un effet principal significatif de la catégorie de déviation angulaire ($F_{1,336} = 23.61, p < .001, \eta_p^2 = .60$) et un effet

d'interaction significatif entre la largeur de la bande dérasée et la catégorie de déviation angulaire ($F_{42,672} = 2.00$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .11$). Aucun autre effet principal ou d'interaction n'a été observé. L'effet de la catégorie était dû au fait que l'essentiel des points de regard était situé autour du point tangent entre -3° à $+3^\circ$ degrés. Concernant l'interaction bande dérasée \times catégorie, les comparaisons *post-hoc* ont montré des différences significatives entre la proportion de points de regard dans la catégorie $[0, 1^\circ]$ en l'absence de bande dérasée (16,6%) et dans les conditions 0.75 m (22,5%) et 1.25 m (23,5%). Une autre différence significative a été observée entre la proportion de points de regard dans la catégorie $[-2, -1^\circ]$ en l'absence de bande dérasée (19,8%) et dans la condition avec une bande dérasée de 1.25 m (11,9%).

4. Discussion

L'objectif de la présente étude était de comparer les stratégies visuo-locomotrices en l'absence et en présence de bande dérasée dans les virages à droite sur les routes bidirectionnelles, dans des conditions où la vitesse des participants était contrôlée. Au plan des données de contrôle latéral, cette étude a répliqué les résultats obtenus dans les conditions de conduite libre de l'étude 2, montrant que les participants ont adopté une déviation latérale dans le virage significativement plus importante vers le bord intérieur de la courbe en présence de bande dérasée. Au plan des données visuelles, il est apparu que l'essentiel des points de regard se situait entre -3 et $+3^\circ$ autour du point tangent, avec des différences significatives dans la distribution de ces points entre les différentes conditions de bande dérasée. En effet, en absence de bande dérasée, une concentration plus importante de points de regard a été observée entre -2 et -1° que dans la condition de bande dérasée la plus large. Aussi, une concentration plus importante des points de regard a été observée entre 0 et 1° en présence des bandes dérasées 0.75 m et 1.25 m qu'en l'absence de bande dérasée. Ces résultats indiquent que les stratégies visuelles étaient organisées en présence de bande dérasée pour se mettre au service de trajectoires passant plus proches du bord intérieur du virage, en faisant l'acquisition de points sur l'environnement routier marqués par une excentricité plus importante sur l'axe horizontal vers la droite. Prises conjointement, les données visuelles et les données de conduite suggèrent donc fortement que la présence d'une bande dérasée sur les routes rurales dans les virages à droite entraîne une modification de la distribution du regard permettant d'opérer un contrôle visuel qui suscite le renforcement des stratégies consistant à davantage couper le virage.

Les données collectées dans cette étude sont cruciales au sens où elles indiquent que les comportements observés en présence d'une bande dérasée dans les virages à droite semblent être principalement dus à un changement dans les processus sensori-moteurs sub-symboliques (qui n'accèdent pas à la conscience) et non à l'expression de processus cognitifs symboliques, de plus haut niveau, rendant compte d'une intention consciente d'adopter de telles trajectoires. En cela, l'application d'une bande dérasée participe à changer la façon dont les conducteurs échantillonnent visuellement leur environnement routier, et la transformation doit être intégrée à la réflexion globale que suscitent actuellement les stratégies d'installation de ce type d'aménagement. En effet, une bande dérasée est installée dans l'objectif principal d'offrir une zone au-delà des lignes de rive en vue de permettre la récupération des sorties (involontaires) de voie, mais son installation risque d'augmenter le temps pendant lequel les conducteurs franchiront le marquage de rive (40% du temps total passé dans le virage avec bande dérasée contre 20% sans bande dérasée tel que cela a été mesuré dans l'étude précédente). Aussi, du fait de l'origine sub-symbolique de la transformation des comportements, l'installation d'une bande dérasée risque de produire des effets délétères sur la sécurité des cyclistes circulant sur l'accotement. L'influence du profil en travers de la route et de la présence d'une bande dérasée sur l'interaction automobiliste-cycliste a été examinée dans la dernière étude du livrable (étude 5).

Points à retenir

- Au plan du contrôle latéral, cette étude réplique les résultats obtenus précédemment : les déviations latérales vers le bord intérieur de la courbe dans les virages à droite sont significativement plus importantes en présence de bande dérasée.
- Au plan de la dynamique du regard, la distribution horizontale des directions de regard référées au point tangent varie en présence d'une bande dérasée.
- Cette variation va dans le sens d'un décalage des directions de regard vers la bande dérasée : le pic de distribution se situe en $[0 ; +1°[$ en présence d'une bande dérasée de 1.25 m tandis qu'il se situe en $[-1 ; 0°[$ en l'absence de bande dérasée.
- Ces résultats confirment l'idée que l'application d'une bande dérasée participe à changer la façon dont les conducteurs échantillonnent visuellement leur environnement routier.
- Les stratégies de prise de virage en présence d'une bande dérasée seraient ainsi principalement dues à un changement dans les processus sensori-moteurs et non à l'expression de processus cognitifs de plus haut niveau, rendant compte d'une intention consciente de couper les virages.

V. Etude 4. Effet du marquage de rive sur le contrôle visuo-locomoteur en virage en présence d'une bande dérasée

1. Introduction

Les résultats de l'étude précédente accréditent l'hypothèse d'une modification du contrôle visuel dans le but d'expliquer les stratégies de positionnement latéral lorsqu'une route rurale bidirectionnelle est équipée d'une bande dérasée. Les résultats ont mis en évidence une déviation des directions de regard (en référence au point tangent) vers l'intérieur de la courbe en présence d'une bande dérasée (quelle que soit sa largeur) comparativement à la condition dans laquelle une bande dérasée n'était pas fournie. Bien que les différences observées entre les conditions de bande dérasée n'étaient pas massives, cette relation entre le guidage visuel et le contrôle de trajectoire en courbe a été amplement démontrée. Plus le regard s'excentre d'une trajectoire donnée, plus la trajectoire dévie dans la direction de cette excentricité (e.g., Mars, 2008 ; Readinger, Chatziastros, Cunningham, Bülthoff & Cutting, 2002 ; Robertshaw & Wilkie, 2008 ; Wilkie, Kountouriotis, Merat & Wann, 2010).

La littérature traitant de l'anticipation et du guidage visuel pour la négociation de virage lors de la locomotion (tout mode confondu : vélo, moto, auto) a montré que différents facteurs dits « route-dépendants » influencent la dynamique du regard, tels que la largeur de la voie et la vitesse de conduite (e.g., Vansteenkiste et al., 2013, 2014), la qualité de surface de la route (e.g., Nagayama et al., 1980), la distance de visibilité dans le virage (e.g., Kandil, Rotter, & Lappe, 2010) ou encore son rayon de courbure (e.g., Robertshaw & Wilkie, 2008). Comme évoqué rapidement dans l'introduction de l'expérimentation précédente, certaines études ont cherché à identifier sur quelles informations visuelles se fondent les conducteurs pour assurer le contrôle de leur véhicule. Parmi celles-ci, il a été montré que l'information visuelle émanant du marquage sert les processus de compensation de la position latérale et joue ainsi un rôle important dans le contrôle visuel de la trajectoire (e.g., Coutton-Jean, Mestre, Goulon & Bootsma, 2009 ; Kountouriotis, Floyd, Gardner, Merat & Wilkie, 2012; Mole, Kountouriotis, Billington & Wilkie, 2016). A titre d'exemple, Kountouriotis et al. (2012) ont manipulé le marquage au centre et en rive de chaussée selon 3 conditions différentes : présence du marquage, marquage estompé et absence de marquage. En contrôlant la direction du regard et donc son influence sur les comportements produits (obligation de fixer une croix dans l'environnement), ces auteurs ont montré que la trajectoire locomotrice déviait dans la direction du marquage manipulé. En d'autres termes, lorsque le marquage extérieur était estompé ou disparaissait, les conducteurs avaient tendance à sous-virer (et donc à rouler en direction du marquage extérieur). A l'inverse, lorsque l'information issue du marquage intérieur était dégradée, les conducteurs avaient tendance à survirer. Ces résultats attestent donc que le contrôle latéral en courbe est altéré lorsque l'information visuelle émanant du marquage est dégradée. Dans le même ordre d'idée, Coutton-Jean et al. (2009) ont manipulé le marquage de part et d'autre de la voie en modifiant dynamiquement sa position dans l'espace au cours de la négociation du virage (i.e., le marquage était soit rapproché soit éloigné du centre de la voie). Les résultats ont mis en évidence des changements systématiques de la position latérale dans la voie lorsque le marquage intérieur était manipulé, mais aucun changement n'a été observé lorsque la position du marquage extérieur était modifiée.

Si ces études présentent l'intérêt de montrer que le marquage joue un rôle important pour le guidage visuel et le contrôle de trajectoire en virage, elles ont comme point commun d'avoir eu recours à une ligne continue en guise de marquage. Dans la présente étude, l'analyse a porté sur les effets des caractéristiques du marquage de rive sur le contrôle visuo-locomoteur en virage en poursuivant une approche applicative. En effet dans le domaine routier, le caractère continu ou discontinu du marquage latéral est pointé pour avoir des effets différenciés sur le comportement des conducteurs (e.g., Davidse, van Driel & Goldenbeld, 2004). Les lignes continues ont de meilleures propriétés de visibilité : elles sont par conséquent détectées plus rapidement et fournissent une information plus

fiable pour le guidage latéral du véhicule. Elles réduiraient ainsi le coût attentionnel exigé par ce contrôle et entraîneraient des vitesses plus élevées. Les lignes discontinues présentent les avantages et inconvénients inverses : elles fourniraient une information moins fiable pour le guidage latéral du véhicule mais une meilleure perception de la vitesse propre. Il est à noter que Kountouriotis et al. (2012) ont également suggéré que le caractère discontinu du marquage de rive est susceptible de dégrader l'information visuelle supportée par le marquage et ainsi altérer le comportement du regard.

L'étude précédente ayant montré que les directions de regard et le contrôle latéral étaient biaisés en direction de la bande dérasée lorsque celle-ci était présente dans les virages à droite, l'objectif de cette quatrième étude a été d'examiner si la manipulation du feedback visuel supporté par le marquage de rive en virage était de nature à influencer ces observations initiales. Quatre types d'implantation du marquage de rive ont été retenus, distribués autour du marquage de rive réglementaire sur route rurale en France (Instruction Interministérielle sur la Signalisation Routière – IISR, 2019). Cette manipulation, qui portait sur les caractéristiques de l'alternance entre les tirets et les intervalles, visait à soit dégrader soit améliorer l'information visuelle émanant du marquage. L'hypothèse principale de cette étude était donc que l'amélioration du signal visuel émanant du marquage de rive permettrait de « redresser » les déviations du regard et de la trajectoire en direction de la voie. La double analyse des mouvements oculaires et du contrôle latéral du véhicule avait de surcroît l'objectif de préciser la contribution respective des processus symboliques et sub-symboliques à ce redressement.

Dans la lignée des études précédentes, l'effet de la manipulation du marquage de rive sur le contrôle visuo-locomoteur en virage a été examiné pour deux largeurs de voie différentes (2.75 et 3.50 m), présentant chacune une bande dérasée de 1.25 m.

2. Méthode

2.1. Participants, dispositif et procédure expérimentale

Vingt participants (âge moyen : 37 ± 9 ans), dont 18 ont participé à l'étude 3, ont été recrutés pour cette expérimentation qui était approuvée par le comité d'éthique local. Tous avaient une vision normale ou corrigée. Les participants avaient leur permis de conduire depuis au moins deux ans et avaient au moins 20 000 km d'expérience de conduite. Tous les participants ont donné leur consentement éclairé avant d'être inclus dans l'étude et étaient naïfs quant aux hypothèses expérimentales.

Les dispositifs expérimentaux utilisés (simulateur de conduite et oculomètre) étaient identiques à ceux utilisés dans l'étude précédente. La procédure suivie était également identique, à la différence que les participants n'ont pas réalisé de phase de familiarisation au dispositif et à la tâche de conduite en virage.

2.2. Conditions expérimentales

Les participants ont conduit sur un total de 8 routes rurales expérimentales correspondant à deux largeurs de voies (3,50 et 2,75 m) et quatre conditions de marquage de rive (dégradée, contrôle, amplifiée, continue) différentes. Les largeurs de voie ont été déterminées sur la base des recommandations pour la conception routière en France (c'est-à-dire 3,50 m ; voir Hall et al., 1998).

Quatre conditions de marquage de rive ont été retenues (voir Figure 15) :

- (i) une condition dite « contrôle », correspondant à une ligne discontinue de type T2, conforme aux instructions relatives aux marques sur chaussée en France, soit des tirets de 3 m et des intervalles de 3.5 m ;

- (ii) une condition dite « dégradée » correspondant à une ligne discontinue dont l'intervalle entre les tirets était augmenté (tirets de 3 m et intervalles de 9.20 m) ;
- (iii) une condition dite « amplifiée » correspondant à une ligne discontinue dont l'intervalle entre les tirets était réduit (tirets de 3 m et intervalles de 1.33 m) ;
- (iv) une condition dite « continue » correspondant à une ligne continue en rive.

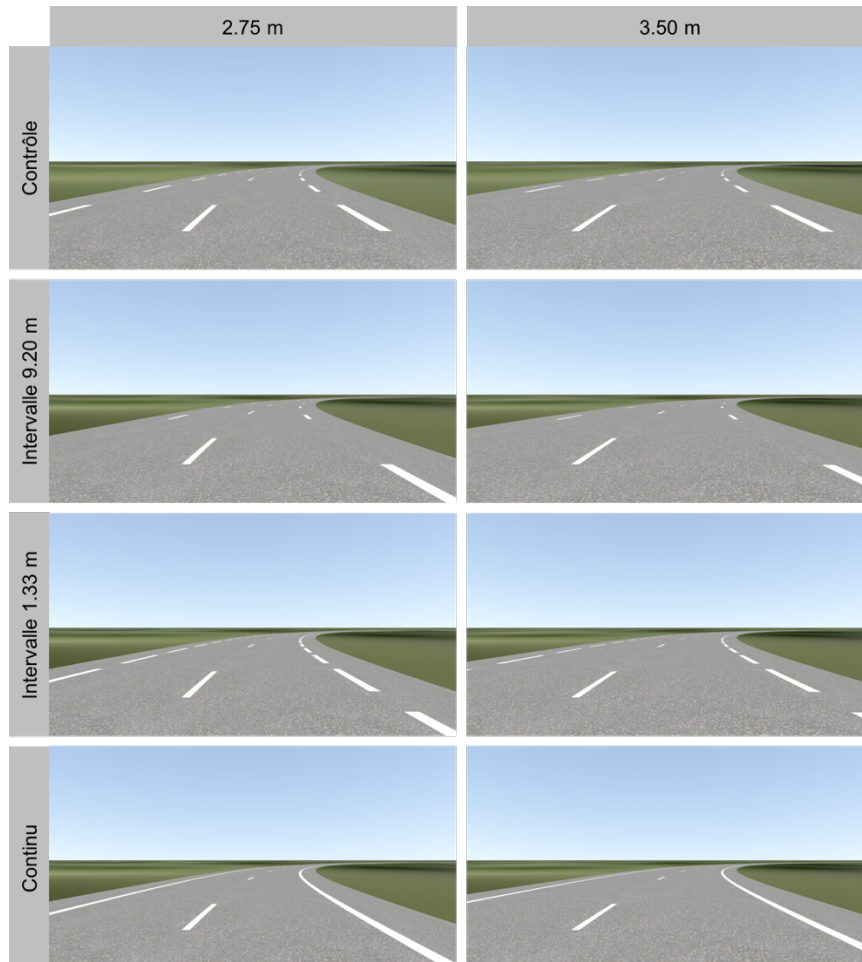


Figure 15. Illustration des huit routes expérimentales, correspondant à deux largeurs de voie (2.75 et 3.50 m) et quatre marquages de rive différents.

Pour chacune de ces routes expérimentales, la largeur de la bande dérasée était fixée à 1.25 m correspondant à la largeur recommandée par la réglementation française pour ce qui concerne les accotements sur les routes rurales. C'est aussi la condition expérimentale pour laquelle les déviations du regard et de la trajectoire au-delà du marquage de rive étaient les plus marquées dans l'étude précédente.

La route expérimentale était une route rurale bidirectionnelle de rase campagne comprenant des virages d'un rayon de courbure et d'une longueur de 200 m, mesurée à partir du centre de la route. La surface de la route était texturée et les marquages de rive et axial étaient respectivement de 0,18 m et 0,15 m de largeur. Le terrain environnant correspondait à un environnement rural de rase campagne sans aucun arbre ni bâtiment. Aucun véhicule n'était présent dans l'environnement routier tout au long de cette expérimentation (ni dans la voie du participant, ni dans la voie opposée).

2.3. Variables dépendantes

Pour chacune des 8 routes, les participants ont réalisé une série de 8 virages. Pour chacun de ces virages, le comportement de conduite a été analysé au travers de la position latérale du véhicule dans la voie et de la direction du regard relativement au point tangent.

Conformément à l'expérimentation précédente, la position latérale du véhicule a été définie comme la distance en centimètres séparant le centre du véhicule du participant et le centre de sa voie de circulation (ou déviation latérale). Les valeurs positives correspondaient à une déviation vers le bord intérieur du virage et les valeurs négatives correspondaient à une déviation vers le bord extérieur du virage. Trois variables relatives à la position latérale ont été calculées : la position latérale à l'entrée du virage ($LP_{\text{Entrée}}$), la position latérale à l'apex (LP_{Apex}) et la position latérale maximale (LP_{Max}).

Les données de position latérale du véhicule ont été analysées à l'aide d'ANOVAs à mesure répétées selon le plan factoriel suivant : 2 (Largeur de Voie : 2.75, 3.50 m) x 4 (Type d'implantation du marquage de rive : contrôle, dégradée, amplifiée, continue). Les traitements statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel Statistica (StatSoft Inc, USA). Le seuil de significativité était fixé à .05. Le test de sphéricité de Mauchly a été utilisé pour déterminer si l'hypothèse de sphéricité était violée. En cas de violation, une correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée pour ajuster les degrés de liberté et analyser les effets. Les comparaisons a posteriori ont été réalisées à l'aide du test de Tukey (HSD). Pour chaque effet, l'éta-carré partiel (η_p^2) a été calculé pour déterminer la proportion de variance totale de la variable dépendante qui est expliquée par la variable indépendante. Les statistiques descriptives ont été reportées avec moyennes et écarts-types (moyenne \pm EC).

La direction du regard a également été exprimée comme la déviation angulaire horizontale de chaque point de regard relativement au point tangent. Avec la position du point tangent comme origine, l'analyse a porté sur la distribution des déviations angulaires horizontales du point de regard pour l'ensemble de la courbe (de -10 à $+10^\circ$, avec un pas de 1° , voir Figure 12). Les déviations angulaires positives correspondaient à des directions de regard situées à droite du point tangent (en dehors de la voie de circulation) et les déviations angulaires négatives correspondaient à des directions de regard situées à gauche du point tangent (situées dans la voie de circulation). Les données oculaires n'ayant pas encore été analysées dans leur totalité, seuls des résultats préliminaires sont rapportés dans la section suivante.

3. Résultats

3.1. Position latérale du véhicule

La Figure 16 représente la position latérale adoptée par les participants dans les virages à droite dans les quatre conditions de marquage de rive pour les deux largeurs de voie.

$LP_{\text{Entrée}}$

L'ANOVA pour $LP_{\text{Entrée}}$ n'a révélé aucun effet principal ou d'interaction. Les participants ont adopté une déviation latérale moyenne de 4 ± 31 cm à l'entrée du virage quelle que fut l'implantation du marquage de rive.

LP_{Apex}

L'ANOVA pour LP_{Apex} n'a pas révélé d'effet principal de la largeur de la voie ou de l'implantation du marquage de rive, mais a indiqué un effet d'interaction significatif entre ces deux facteurs ($F_{3,57} = 3.34$, $p = .025$, $\eta_p^2 = .15$). Les tests post-hocs pour cette interaction n'ont pas montré de différences significatives.

LP_{Max}

Concernant la déviation latérale maximale dans le virage, l'ANOVA a révélé un effet principal significatif de la largeur de voie ($F_{1,19} = 11.62$, $p = .003$, $\eta_p^2 = .38$). Aucun autre effet principal ou d'interaction n'a été observé. La déviation latérale adoptée par les participants était significativement plus importante dans la voie de 3.50 m (53 ± 33 cm) que dans la voie de 2.75 m (46 ± 28 cm).

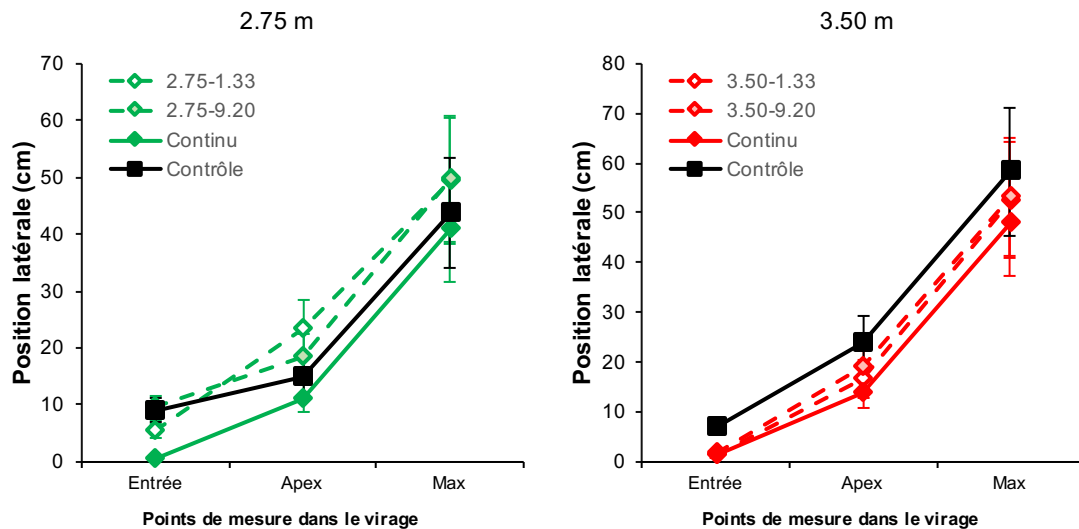


Figure 16. Position latérale moyenne aux différents points de mesure en fonction de la largeur de la voie et des caractéristiques du marquage en rive. Le zéro représente le centre de la voie. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

3.2. Déviation angulaire des points de regard

Les données de déviations angulaires des directions de regard ont été extraites, à ce stade, pour seulement 9 des 18 participants. Ces données ont été extraites pour chacune des huit conditions expérimentales (2 largeurs de voie x 4 types d'implantation du marquage de rive) et les proportions des directions de regard pour chacune des catégories de déviations angulaires ont été calculées. Les données analysées sont présentées dans les Figure 17 et Figure 18 à des fins d'illustration.

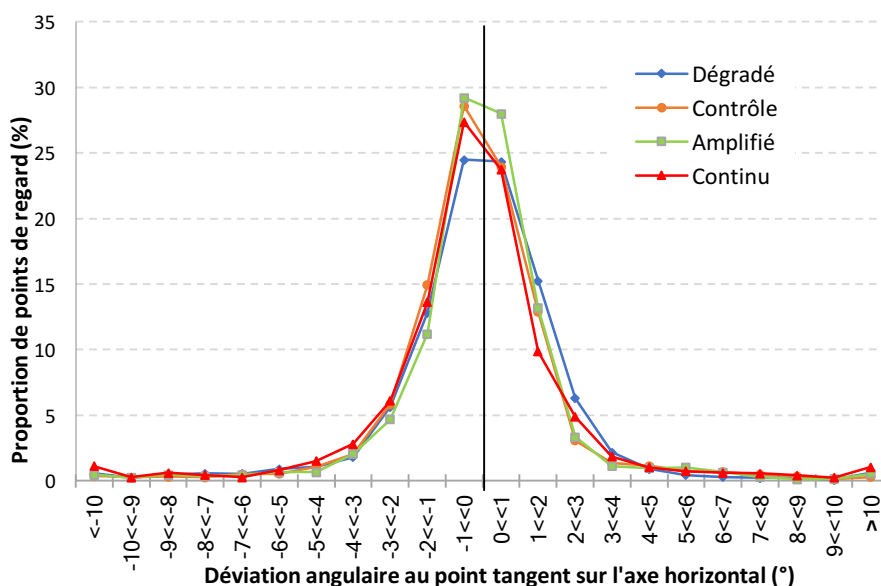


Figure 17. Proportion des directions de regard (%) en fonction du marquage de rive et de l'amplitude de la déviation au point tangent.

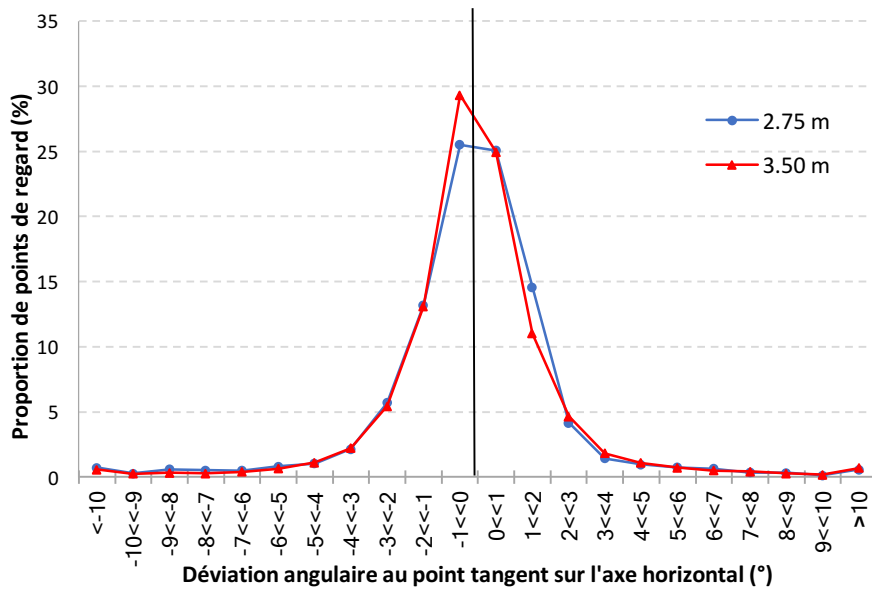


Figure 18. Proportion des directions de regard (%) en fonction de la largeur de la voie et de l'amplitude de la déviation au point tangent.

4. Conclusion

Bien que les analyses présentées ici ne sont que préliminaires, les données de position latérale ont indiqué que le type d'implantation du marquage de rive ne semble pas influencer les trajectoires mises en œuvre par les participants dans les virages à droite. En effet, l'implantation d'un marquage discontinu avec un intervalle augmenté ou réduit n'a pas produit de différences significatives dans les différentes mesures de déviation latérale dans le virage. Concernant l'implantation d'un marquage continu, bien que les conducteurs se sont éloignés du bord de rive dans les deux largeurs de voie en comparaison du marquage contrôle, les différences observées n'étaient pas significatives. Au plan des données visuelles, l'analyse partielle des données présentée ici ne semble pas plaider en faveur d'une influence du type d'implantation du marquage de rive sur les directions de regard dans le virage.

VI. Etude 5. Effet de la présence d'une bande dérasée sur le comportement de dépassement d'un cycliste en virage

1. Introduction

Les bénéfices de la pratique cycliste aux plans environnemental, sanitaire et financier ont conduit à une croissance de la mobilité cycliste dans les pays occidentaux (Pucher et al., 2011). Cette croissance souffre toutefois d'un manque d'infrastructures dédiées, de sorte qu'il existe de nombreuses zones dans lesquelles les cyclistes doivent partager la route avec les véhicules motorisés. En Europe, les routes rurales n'ont généralement pas de pistes cyclables séparées, mais seulement des bandes dérasées multifonctionnelles adaptées à la pratique cycliste. De ce fait, les interférences entre automobilistes et cyclistes y sont plus fréquentes que dans les zones urbaines où le trafic cycliste est souvent séparé des véhicules. Ainsi, bien que la quantité de cycles est bien plus grande dans les zones urbaines, les routes rurales représentent un problème de sécurité important car elles concentrent 45 % des cyclistes tués en Europe (ERSO, 2016). Elles génèrent également un plus grand nombre d'accidents graves impliquant des cyclistes en raison de la vitesse plus élevée des automobilistes (Boufous et al., 2012). Sur les routes rurales, les interactions entre automobilistes et cyclistes lors des dépassements sont donc particulièrement dangereuses pour les cyclistes qui ne sont pas protégés par leur véhicule en cas d'accident (Wegman et al., 2012). La présente étude visait à étudier l'impact de la configuration d'une route rurale bidirectionnelle sur le comportement de dépassement des conducteurs dans les virages, en vue de fournir des recommandations qui tiennent compte de la sécurité des cyclistes.

L'influence de la conception routière sur le comportement des conducteurs lors du dépassement de cyclistes a été évaluée principalement en situation réelle avec des cycles instrumentés permettant de mesurer l'inter-distance latérale laissée par les automobilistes au moment du dépassement. Il a été montré que l'inter-distance latérale augmentait avec la largeur de la voie (Love et al., 2012), la largeur du profil en travers (García et al., 2015 ; Harkey & Stewart, 1997) et la position du cycliste dans la bande dérasée (Kay et al., 2014 ; Savolainen et al., 2012 ; Walker, 2007). L'influence de la largeur de la bande dérasée sur le comportement de dépassement des conducteurs a aussi été l'objet de plusieurs travaux sur les routes rurales qui ont fait état de résultats contradictoires. Certaines études ont montré que les véhicules dépassaient les cyclistes de plus près lorsque la largeur des bandes dérasées était inférieure à 1,22 ou 1,50 m (García et al., 2015 ; Harkey & Stewart, 1997), tandis que d'autres ont indiqué que la largeur de la bande dérasée n'avait aucun effet sur l'inter-distance latérale (Dozza et al., 2016 ; Mecheri et al., 2020). D'autres travaux portant sur la présence ou l'absence de bande dérasée (ou de voies cyclables) ont systématiquement montré une réduction significative de l'inter-distance latérale lorsque le cycliste roulait sur une bande dérasée (ou sur une voie cyclable, voir Beck et al., 2019 ; Mecheri et al., 2020 ; Parkin & Meyers, 2010). Parkin et Meyers (2010) ont montré que les conducteurs adoptaient des inter-distances de dépassement plus réduites en présence qu'en absence de voies cyclables sur les routes à grande vitesse, tandis que Beck et al. (2019) ont montré à la fois des distances de dépassement plus réduite et une plus grande proportion de dépassements rapprochés (<1m) dans de telles circonstances. Ces résultats ont été corroborés par une récente étude menée sur simulateur (Mecheri et al., 2020) dans laquelle les cyclistes ont roulé alternativement sur la voie ou sur la bande dérasée tout en maintenant des contraintes spatiales latérales identiques pour réaliser le dépassement (i.e., distance entre la ligne axiale et le cycliste). Cette étude a montré que les conducteurs s'éloignaient davantage des cyclistes lorsqu'ils roulaient sur la voie que lorsqu'ils roulaient sur la bande dérasée, malgré une contrainte spatiale constante de 3,25 m entre les conditions. Dans ces trois études (Beck et al., 2019 ; Mecheri et al., 2020 ; Parkin & Meyers, 2010), il a été suggéré que la présence d'un cycliste roulant sur la bande dérasée change radicalement la perception qu'ont les conducteurs de la situation routière. Lorsque le cycliste se trouve sur la voie de circulation, le conducteur doit effectuer une manœuvre de dépassement de

manière « consciente » car le cycliste se trouve dans le même espace de circulation que lui. En revanche, lorsque le cycliste se trouve sur la bande dérasée, le conducteur dispose d'une voie complètement dégagée devant lui ce qui réduit l'importance des processus d'estimation de quelle est l'inter-distance latérale appropriée pour réaliser le dépassement en toute sécurité. La littérature fait donc état d'un ensemble convergent d'études montrant que la bande dérasée produit un fort effet de séparation visuelle du flux cycliste chez les conducteurs, qui les amène à contrôler leur manœuvre de dépassement davantage en fonction des limites de leur voie que des besoins du cycliste.

Le fait que les conducteurs engagent des manœuvres de dépassement moins prononcées lorsqu'un cycliste circule sur une bande dérasée porte potentiellement des effets délétères sur la sécurité des cyclistes dans le contexte des dépassements menés dans les virages sur les routes rurales. En effet, l'étude 2 du présent livrable a montré que les participants dévient nettement plus vers le bord extérieur de la voie en présence qu'en absence de bande dérasée à l'approche des virages à gauche mais pas à l'approche des virages à droite. Une fois dans le virage (i.e., à l'apex et pour la déviation latérale maximale), les participants ont dévié davantage vers le bord intérieur de la voie dans les virages à droite mais pas dans les virages à gauche en présence qu'en absence de bande dérasée (voir également, Bella 2013 ; Ben-Bassat & Shinar, 2011). La présence d'une bande dérasée affecte donc la négociation des virages en augmentant la déviation par rapport au centre de la voie aux moments où le déplacement du véhicule implique une déviation vers la droite (à l'approche de virages à gauche mais pas des virages à droite, et dans les virages à droite mais pas les virages à gauche). Un autre résultat frappant de cette étude était que les trajectoires induites par la présence d'une bande dérasée dans les virages à droite n'étaient pas adaptées à la largeur de la voie lorsque les participants roulaient sur une voie étroite (2,75 contre 3,50 m). En effet, puisque les participants ont coupé les virages à droite de manière aussi prononcée dans la voie la plus étroite que dans la voie la plus large, ils ont passé un temps très substantiel en dehors de la voie dans cette condition (45%). A la vue de ces résultats, l'influence de la bande dérasée sur les processus de contrôle de trajectoire sur les routes rurales peut avoir un effet délétère sur la sécurité des cyclistes circulant sur le côté droit de la route. Aucune étude, à ce jour, indique si cette influence de la bande dérasée sur le contrôle de trajectoire persiste lorsqu'un cycliste se trouve dans la bande dérasée.

Un autre risque émanant de la stratégie des conducteurs consistant à couper les virages à droite de manière accrue – et à rouler davantage en dehors de la voie de circulation – en présence de bande dérasée est à mettre en lien avec les programmes de redistribution du profil en travers. Les programmes de redistribution du profil en travers consistent à reconfigurer la combinaison entre la largeur de la voie et de la bande dérasée en déplaçant le marquage de rive vers le centre de la route, et sont en vigueur depuis plus d'une décennie en France. Dans ce type de programme, la largeur de chaque voie est réduite concomitamment à un élargissement de la bande dérasée (voir Mecheri et al., 2017 ; Rosey & Auberlet, 2009 ; Rosey et al., 2012), ce qui offre une zone de récupération aux conducteurs et une bande dérasée suffisamment large pour permettre la circulation des cyclistes (voir Mecheri et al., 2020). La redistribution du profil en travers combine donc les effets de trois facteurs qui peuvent potentiellement contribuer, pris individuellement, à augmenter le niveau de risques pesant sur les interactions automobiliste-cycliste sur routes rurales. D'abord, la redistribution du profil en travers a pour conséquence d'aménager une bande dérasée dont on sait qu'elle renforce la déviation latérale vers le bord intérieur de la voie dans les virages à droite et peut ainsi mener à des dépassements réalisés avec moins d'inter-distance latérale. Ensuite, la redistribution du profil en travers, en permettant aux cyclistes de rouler dans la bande dérasée plutôt que dans la voie de circulation, opère une mise en séparation visuelle du trafic cycliste dont on sait qu'elle produit des manœuvres de dépassement moins conscientes, plus rapprochées du cycliste et à plus grande vitesse (Beck et al., 2019 ; Mecheri et al., 2020 ; Parkin & Meyers, 2010). Enfin, la redistribution du profil en travers impose aux conducteurs de circuler sur une voie plus étroite adjacente à une zone de récupération, soit une situation dont on sait qu'elle augmente le temps passé hors de la voie dans les virages à droite. La question du comportement de conduite en virage dans une situation de dépassement d'un cycliste circulant sur la bande dérasée mérite donc d'être étudiée.

À notre connaissance, une seule étude a porté sur l'inter-distance latérale laissée par les automobilistes lorsqu'ils dépassent des cyclistes circulant sur la bande dérasée en fonction de la géométrie de la route (section droite, courbe à gauche, courbe à droite ; Bella & Silvestri, 2017). En ligne droite, les cyclistes ont été dépassés avec les inter-distances latérales les plus réduites et sans réduction de vitesse de la part des automobilistes par rapport à la condition sans cycliste. Dans les virages à gauche, les cyclistes ont reçu les inter-distances latérales les plus élevées parce que les conducteurs ont adopté des stratégies consistant à couper le virage qui les ont amenés à s'éloigner du cycliste. Dans les virages à droite, la présence du cycliste a incité les participants à ralentir et à se déplacer vers le centre de la route au moment du dépassement, ce qui a produit des inter-distances latérales plus élevées que dans les sections droites mais plus faibles que dans les virages à gauche. Ainsi, si cette étude (Bella & Silvestri, 2017) a fourni des données très utiles montrant que les conducteurs modifient la proximité de leurs dépassements en fonction de la direction de la courbe, elle s'est focalisée sur des situations de dépassements qui se sont toutes produites à l'intérieur du virage et en absence de trafic dans la voie opposée. Par conséquent, elle ne fournit pas d'informations sur la fenêtre temporelle la plus critique du point de vue de la sécurité d'un cycliste dans les virages à gauche, qui n'est pas située dans le virage lorsque les conducteurs s'éloignent naturellement des cyclistes mais à l'approche du virage lorsque les conducteurs se dirigent vers la partie extérieure de la voie (i.e., vers la bande dérasée). Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires pour déterminer si les conducteurs adaptent ou non l'excentricité de leur déviation latérale vers l'extérieur de la voie lorsqu'ils approchent des virages à gauche avec un cycliste circulant dans la bande dérasée. En ce qui concerne les virages à droite, si l'étude de Bella et Silvestri (2017) a montré que les conducteurs opèrent un déplacement vers le centre de la route au moment du dépassement – produisant ainsi des inter-distances latérales plus importantes que dans les sections droites –, il reste à déterminer si un tel déplacement est toujours réalisé en présence de trafic dans la voie opposée et si celui-ci est modulé en fonction des contraintes spatiales imposées par la largeur de voie. Pour répondre à ces questions, deux expérimentations ont été menées pour analyser la manière dont les conducteurs dépassent un cycliste circulant sur la bande dérasée à l'approche des virages à gauche et au milieu des virages à droite. Dans l'expérimentation 1, les participants ont eu à négocier une série de virages à gauche et à droite en présence et en l'absence de cyclistes circulant sur la bande dérasée, tout en manipulant la largeur de la voie pour faire varier le niveau de contrainte spatiale pesant sur la manœuvre de dépassement. L'expérimentation 2 a été conçue pour évaluer l'efficacité d'une redistribution du profil en travers qui modifierait la configuration routière sans altérer les contraintes spatiales pesant sur la manœuvre de dépassement à offrir des bénéfices de sécurité pour les cyclistes dans les virages.

2. Méthode Générale

2.1. Participants

Vingt-six volontaires, tous ayant une vision normale ou corrigée, ont accepté de participer aux deux expérimentations composant cette étude. Les participants avaient leur permis de conduire depuis au moins deux ans et avaient une expérience de conduite d'au moins 20 000 km. Trois participants n'ont pu aller au bout de la session expérimentale en raison d'un mal du simulateur ressenti au bout de quelques minutes de conduite, ce qui a ramené l'effectif de l'expérimentation à 23 (âge moyen 36 ± 10 ans). Tous les participants ont donné leur consentement éclairé avant d'être inclus dans l'étude et étaient naïfs quant aux hypothèses expérimentales. Les deux expérimentations ont été approuvées par le comité d'éthique local.

2.2. Dispositif expérimental

L'expérimentation a été menée à l'aide d'un simulateur de conduite à bas coût composé d'un volant à retour de force, de pédales et d'une boîte de vitesses (Logitech G25) montés sur un siège de type voiture de course. En lien avec les résultats issus de la première étude du projet PROFIL+, une cabine

complète virtuelle représentant le gabarit du véhicule piloté à l'échelle 1 a été utilisé afin de capturer de façon effective les stratégies de contrôle latéral des participants (largeur du véhicule simulé = 1.60 m, rétroviseurs exclus). Pour cette étude, le simulateur était équipé d'un limiteur de vitesse fixé à 90 km/h. L'environnement visuel était affiché sur trois écrans de 1,22 m de large et 0,70 m de haut (fréquence de rafraîchissement de 60 Hz, avec une résolution de 3840 × 2160 pixels). La distance entre la tête des participants et le centre de chaque écran était de 1,05 m. Dans cette configuration, l'angle visuel formé par les trois écrans était de 180° horizontalement et de 37° verticalement. Trois haut-parleurs ont généré des bruits moteur et environnementaux réalistes pour améliorer l'expérience du conducteur. Le compteur de vitesse était affiché pendant l'expérimentation. Les données ont été recueillies à une fréquence d'échantillonnage de 60 Hz et comprenaient des informations sur le comportement du conducteur (actions sur le volant et les pédales) et le véhicule simulé (position et vitesse).

2.3. Bases visuelles 3D

La route expérimentale était une route rurale bidirectionnelle de rase campagne d'une longueur de 26,45 km. Le tracé de la route consistait en une série de 28 virages ordonnés de façon aléatoire (14 virages à gauche et 14 virages à droite), séparés par des sections droites de 750 m. Tous les virages avaient un rayon de courbure et une longueur de 200 m, mesurée à partir du centre de la route. La surface de la route était texturée et marquée sur les bords par une ligne discontinue de 0,18 m de largeur sur les bords et de 0,15 m au centre. Le terrain environnant correspondait à un environnement rural de rase campagne contenant des arbres placés avec un écart minimum de 20 m du bord de la route. L'espacement des arbres était aléatoire, mais répété tous les 100 m afin de contrôler le nombre de discontinuités qui passaient par un point fixe dans le champ visuel du conducteur (Denton, 1980). La limite de vitesse était fixée à 90 km/h.

Un cycliste masculin utilisant un vélo de route et portant une tenue typique d'un cycliste circulant sur une route bidirectionnelle a été utilisé pour l'expérimentation. Une seule condition de trafic a été mobilisée pour cette étude : un trafic continu dans la voie opposée tout au long de la route expérimentale (10 VL/min tous roulant à 90 km/h, soit une distance de 150 m entre les VL). Les véhicules ont été positionnés de façon à ce que bord du véhicule se trouve à 60 cm de la ligne axiale quelle que soit la largeur de voie pratiquée. Ce type de trafic a été choisi afin que les participants ne puissent pas se défaire des contraintes spatiales de la situation en franchissant la ligne axiale pour réaliser le dépassement. Aucun véhicule n'était présent dans la voie du participant.

2.4. Conception expérimentale

Les deux expérimentations ont été conçues de manière à ce que les dépassements surviennent durant l'approche des virages à gauche et autour du milieu des virages à droite. A cette fin, les cyclistes ont été positionnés avec une vitesse nulle 145 m et 34 m avant l'entrée des virages à gauche et à droite, respectivement. Dès que le participant se trouvait 400 m derrière un cycliste, le cycliste commençait à rouler pour une période initiale de 2 secondes à une vitesse constante de 25 km/h. Après cette période initiale, la vitesse des cyclistes devenait régulée en fonction de celle du participant, avec un offset de 65 km/h. Si le participant roulait à une vitesse de 90 km/h au moment où la vitesse du cycliste devenait régulée par rapport à la sienne (voir Procédure), cet offset garantissait que les dépassements se produisent aux localisations souhaités (i.e., durant l'approche des virages à gauche et au milieu des virages à droite).

Bien que cette méthode permettait de contrôler la localisation spatiale des dépassements, elle impliquait également qu'une vitesse de conduite inférieure à 65 km/h attribue une vitesse nulle au cycliste. Lorsqu'un tel cas de figure se produisait brièvement, cela n'avait aucune incidence sur l'expérience des participants (et une incidence seulement marginale sur la localisation longitudinale du dépassement) car le cycliste était animé avec une fréquence de pédalage constante quelle que soit sa vitesse (y compris à vitesse nulle). Toutefois, lorsqu'un tel cas de figure se produisait pendant

une période plus prolongée, la localisation longitudinale du dépassement pouvait être significativement altérée et située en dehors des points d'intérêt de l'étude (i.e., durant l'approche des virages à gauche et autour du milieu des virages à droite). Pour cette raison, une première étape dans l'analyse des données a consisté à identifier les participants pour lesquels les dépassements étaient réalisés en dehors des localisations souhaitées, en vue de les exclure des analyses statistiques (voir Résultats).

2.5. Procédure

Les participants ont été informés qu'ils devraient rouler comme s'ils conduisaient leur propre véhicule sur une route rurale bidirectionnelle, tout en respectant la limite de vitesse de 90 km/h. Après avoir rempli le formulaire de consentement, les participants étaient ensuite invités à s'asseoir dans le simulateur et encouragés à ajuster leur siège pour se sentir à l'aise. Il leur a ensuite été donné la possibilité de se familiariser avec le simulateur au cours de deux périodes de familiarisation. La première familiarisation consistait à conduire sur une route rurale sinueuse (longueur : 6,4 km) composée de virages d'un rayon de courbure de 150 m et 300 m variant en longueur et en direction, sans aucun autre usager de la route. La deuxième familiarisation consistait à conduire sur une route rurale qui présentait le même tracé et le même trafic que les routes expérimentales, et confrontait les participants à quatre situations de dépassement. Avant la deuxième familiarisation et avant chaque condition expérimentale, il était demandé aux participants de rouler à une vitesse constante de 90 km/h le long d'une zone délimitée dans chaque section droite avec du marquage au sol (longueur de la zone = 175 m). Pour s'assurer du respect de ce critère, il a été demandé aux participants de s'appuyer sur le limiteur de vitesse tout au long de cette zone. Cette procédure a permis de contrôler les conditions initiales (i.e., le cycliste et le participant roulant à 25 km/h et 90 km/h, respectivement) au moment exact où la vitesse du cycliste commençait à être régulée par rapport à celle du participant, sans influencer le comportement de conduite dans les virages. En dehors de cette instruction, les participants n'ont reçu aucune contrainte concernant leur comportement. Tous les participants ont réalisé les deux expérimentations au cours d'une seule session expérimentale. L'ordre des deux expérimentations et des deux routes expérimentales au sein de chaque expérimentation a été contrebalancé entre les participants. Les participants ont fait une pause de 5 minutes entre les deux expérimentations, pendant laquelle ils ont quitté le simulateur. L'ensemble de l'étude a été réalisé en une heure et 45 minutes environ.

2.6. Variables dépendantes

Trois variables dépendantes ont été retenues pour caractériser l'interaction automobiliste-cycliste au moment du dépassement (i.e., moment où la différence entre les positions longitudinales du véhicule et du cycliste était minimale dans les données échantillonnées) : l'inter-distance latérale de dépassement, la vitesse de dépassement et la différence de position latérale. L'inter-distance latérale a été définie comme la distance en centimètres entre le rétroviseur droit du véhicule et l'épaule gauche du cycliste au moment du dépassement. La vitesse de dépassement correspondait à la vitesse du véhicule du participant au moment du dépassement (en km/h). La différence de position latérale a été définie comme la différence entre la position latérale moyenne adoptée au moment du dépassement et la position latérale moyenne adoptée dans les virages en absence de cycliste au point correspondant à la localisation longitudinale moyenne de dépassement. La localisation longitudinale moyenne de dépassement correspondait à la moyenne des localisations individuelles des 7 manœuvres de dépassements réalisées au sein d'une condition expérimentale pour un participant.

3. Expérimentation 1 – Manipulation des contraintes spatiales

Dans l'Expérimentation 1, il a été demandé aux participants de négocier une série de virages à gauche et à droite en présence et en l'absence de cyclistes circulant sur la bande dérasée. Dans les virages à gauche, pour lesquels les dépassements se sont produits durant l'approche du virage,

l'objectif était d'examiner dans quelle mesure les participants – dont on sait qu'ils dévient latéralement vers le bord extérieur de la voie à l'approche d'un virage en l'absence de cycliste – adapteraient cette stratégie de positionnement lorsqu'un cycliste circule sur la bande dérasée. En raison de l'effet de séparation visuelle du flux cycliste produit par la bande dérasée (Beck et al., 2019 ; Mecheri et al., 2020 ; Parkin & Meyers, 2010), il était attendu que les participants maintiennent une approche sur la demi-voie extérieure en présence d'un cycliste, mais avec une position plus éloignée du marquage de rive afin d'éviter de dépasser les cyclistes de près. Dans les virages à droite, pour lesquels les dépassements se sont produits autour du milieu du virage, l'objectif était d'évaluer la propension des participants à opérer un déplacement vers le centre de la route au moment du dépassement alors que des véhicules circulent dans la voie opposée. Ces deux lignes d'investigation ont été explorées en manipulant le niveau de contrainte spatiale en utilisant deux voies d'une largeur de 2,75 et de 3,50 m adjacentes à la bande dérasée.

3.1. Méthode

Les participants ont conduit sur deux routes rurales expérimentales créées en manipulant deux largeurs de voies (3,50 et 2,75 m) adjacentes à une bande dérasée de 0,75 m (voir Figure 19). À l'exception de la largeur de la voie, les deux routes étaient identiques en termes de géométrie. La largeur de la voie a été déterminée sur la base de la largeur de voie la plus courante en France sur routes bidirectionnelles (i.e., 3.50 m, voir Hall et al., 1998). La largeur de la bande dérasée a été déterminée à partir de la réglementation française pour les bandes dérasées multifonctionnelles permettant la pratique cycliste (largeur minimale = 0,75 m). Pour chaque route expérimentale, les participants ont négocié 14 virages en présence d'un cycliste (7 dans chaque direction) et 14 virages en l'absence de cycliste (7 dans chaque direction). Les cyclistes étaient latéralement positionnés 0,50 m à droite du bord intérieur du marquage de rive sur les deux routes expérimentales. Leur position longitudinale a été assignée de façon randomisée pour chaque route expérimentale mais était constante entre les participants. Chaque participant a effectué une session de conduite sur chaque route expérimentale, ce qui a produit 7 répétitions pour chaque direction de virage (gauche, droite) et chaque situation de conduite (absence, présence d'un cycliste). Chaque session de conduite a duré environ 18 minutes, en fonction de la vitesse de conduite du participant.

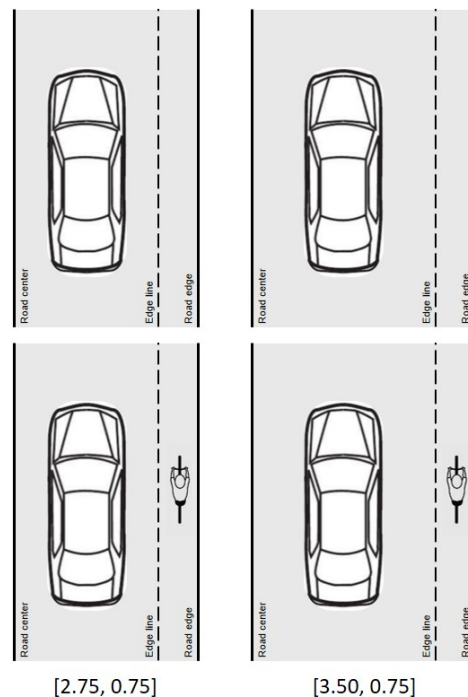


Figure 19. Représentation schématique des deux routes expérimentales en absence (haut) et en présence (bas) d'un cycliste circulant sur la bande dérasée. A gauche : la route composée d'une voie de 2.75 m. A droite : la route composée d'une voie de 3.50 m.

3.2. Analyse statistique

L'analyse statistique visait à déterminer si la largeur de la voie avait un effet sur les manœuvres de dépassement réalisées par les participants, caractérisées au moyen de l'inter-distance latérale, la vitesse de dépassement et la différence de position latérale. Les manœuvres de dépassement ont été évaluées à l'aide de tests t pour échantillons appariés (ou de tests Wilcoxon W, en fonction de la distribution des variables) entre les deux largeurs de voie pour chaque direction de virage, avec les tailles d'effets exprimées par le d de Cohen. Les statistiques descriptives ont été reportées avec moyennes et écarts-types (moyenne \pm EC).

3.3. Résultats et discussion

Localisation spatiale des dépassements

Pour limiter les variations de localisation longitudinale entre les manœuvres de dépassements analysées, il a été décidé d'exclure tous les participants dont les localisations moyennes individuelles étaient supérieures ou inférieures d'un écart-type à la localisation moyenne de l'échantillon. En appliquant cette procédure, les données de trois participants ont été exclues, ce qui a permis d'obtenir un échantillon final de 20 participants. Après exclusion, la localisation moyenne des dépassements (relativement à l'entrée du virage) était de -18 ± 9 m à l'approche des virages à gauche et 102 ± 8 m au milieu des virages à droite.

Vitesse, inter-distance latérale et différence de position latérale

La Figure 20 représente la vitesse de dépassement et l'inter-distance latérale de dépassement à l'approche des virages à gauche et dans les virages à droite en fonction de la largeur de voie.

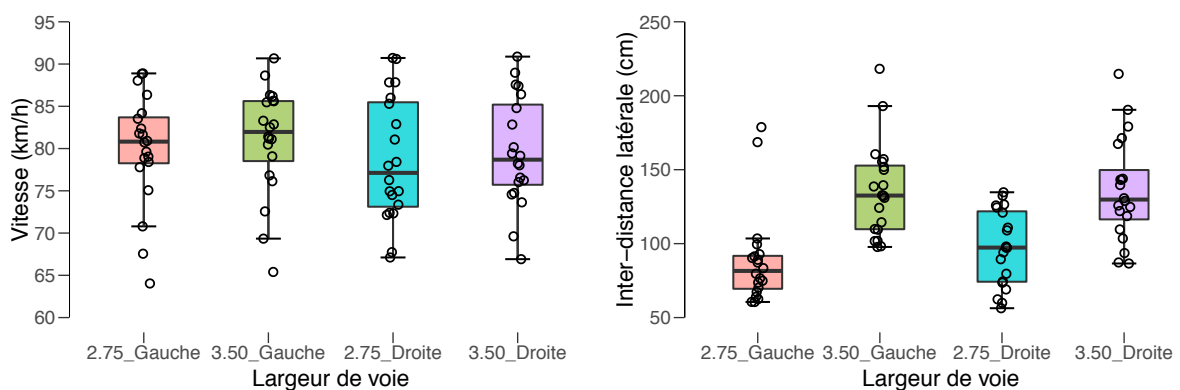


Figure 20. Inter-distance latérale et vitesse de dépassement en fonction de la largeur de voie.

La vitesse de dépassement était similaire entre les deux largeurs de voie dans les virages à droite ($t_{19} = -1.62, p = .12$), mais se distinguait significativement entre les deux largeurs de voie à l'approche des virages à gauche ($t_{19} = -2.32, p = .03, d = -0.52$). A l'approche des virages à gauche, les participants ont adopté une vitesse de dépassement significativement inférieure sur la voie la plus étroite (79 ± 7 km/h) en comparaison de la voie la plus large (81 ± 6 km/h).

L'inter-distance latérale de dépassement était influencée de façon significative par la largeur de voie à l'approche des virages à gauche ($t_{19} = -17.79, p < .001, d = -3.98$) et dans les virages à droite ($t_{19} = -9.62, p < .001, d = -2.15$). Comme attendu du fait de l'impact mécanique de la largeur de voie sur la distance séparant le cycliste du centre de la route, les participants ont réalisé les dépassements avec une plus grande inter-distance latérale dans la voie la plus large dans les deux directions (2,75 m-gauche = 89 ± 32 cm ; 3,50 m-gauche = 136 ± 32 cm ; 2,75 m-droite = 97 ± 26 cm ; 3,50 m-droite = 136 ± 35 cm). Ces résultats sont conformes aux études antérieures ayant analysé le comportement

dépassement sur route rurales en section droites, qu'elles furent menées en situation réelle (García et al., 2015 ; voir également Love et al., 2012, en contexte urbain) ou sur simulateur (Mecheri et al., 2020).

Concernant la différence de position latérale, la Figure 21 montre en premier lieu que les participants, en comparaison de la position qu'ils ont adopté dans le virage en l'absence de cycliste, ont tous opéré un dégagement latéral dans la direction opposée à celle du cycliste pour réaliser le dépassement. A l'approche des virages à gauche, la différence de position latérale était similaire entre dans les deux largeurs de voie ($W_{19} = 63.00, p = .12$). Dans les virages à droite, cette différence se distinguait significativement entre les deux largeurs de voie ($t_{19} = 2.42, p = .03, d = 0.54$), avec un plus grand effort de dégagement latéral dans la voie de 3.50 m (-86 ± 35 cm) que dans la voie la plus étroite (-74 ± 28 cm).

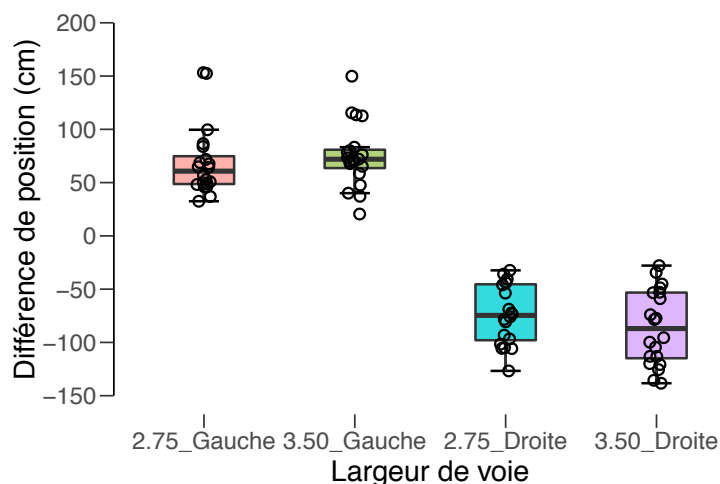


Figure 21. Différence de position latérale en fonction de la largeur de voie.

En résumé, les résultats ont montré une inter-distance latérale significativement plus grande dans la voie de 3.50 m à l'approche des virages à gauche et dans les virages à droite, mais cette différence ne reflétait pas une transformation de l'effort de dégagement latéral opéré par les participants dans les deux directions. En effet, à l'approche des virages à gauche, l'augmentation significative de l'inter-distance latérale de dépassement n'était pas concomitante d'une plus grande différence de position latérale. Ensembles, ces résultats impliquent que les participants ont produit le même effort de dégagement entre les deux largeurs de voie en référence à la position qu'ils ont adopté pour négocier le virage sans cycliste. L'augmentation significative de l'inter-distance latérale observée dans la voie de 3.50 m tient donc probablement davantage à l'effet mécanique induit par une augmentation de la largeur de voie sur le niveau de contrainte spatiale (i.e., distance séparant le cycliste du centre de la route) qu'à une transformation du comportement de dépassement dans cette condition. Cette absence de transformation de la manœuvre de dépassement entre les deux largeurs de voie à l'approche des virages à gauche est certainement expliquée par le fait que les participants ont réduit leur vitesse sur la voie la plus étroite pour adapter le niveau de sécurité du dépassement.

Dans les virages à droite, bien que les participants n'ont pas adapté leur vitesse de dépassement en fonction de la largeur de voie, ils ont dépassé les cyclistes dans la voie la plus large avec une plus grande inter-distance latérale et un plus grand effort de dégagement latéral. Les participants ont donc utilisé le plus grand espace de manœuvre qui était à leur disposition dans la voie la plus large pour accorder davantage d'espace aux cyclistes, malgré la présence de trafic dans la voie opposée. Au plan applicatif, ce résultat implique que la fourniture d'une plus grande largeur de voie sur les routes rurales bidirectionnelles aura une traduction concrète sur la sécurité des cyclistes dépassés au

milieu des virages à droite car les conducteurs utilisent cet espace supplémentaire pour dépasser les cyclistes de moins près. L'observation de ce plus grand effort de dégagement latéral induit ici par une manipulation du niveau de contrainte pour réaliser la manœuvre de dépassement pose la question de la possibilité qu'une telle transformation du comportement puisse survenir par une simple manipulation de la configuration routière (i.e., avec une contrainte spatiale identique). L'expérimentation 2 a été conçue pour répondre à cette question.

4. Expérimentation 2 – Manipulation de la distribution du profil en travers

L'expérimentation 2 a été conçue pour évaluer la capacité d'un programme de redistribution du profil en travers à produire des bénéfices de sécurité pour les cyclistes lorsqu'ils sont dépassés dans les virages. Une méthode pré-post couramment utilisée pour évaluer les aménagements routiers a été appliquée, en comparant le comportement de dépassement des conducteurs sur une route contrôle (voie de 3,50 m, sans bande dérasée) et une redistribution de cette route contrôle (voie de 2,75 m, adjacente à une bande dérasée de 0,75 m). Sur ces deux routes expérimentales, les cyclistes étaient latéralement positionnés à 0,25 m du bord extérieur de la route. De cette façon, les conditions expérimentales ont permis d'analyser le comportement de dépassement des participants lorsque le cycliste circulait dans la voie de circulation (route contrôle) ou dans la bande dérasée (route redistribuée), avec la même contrainte spatiale pour réaliser le dépassement (3,25 m). De la même manière que dans l'Expérimentation 1, les dépassements se sont produits pendant l'approche des virages à gauche et autour du milieu des virages à droite. Conformément aux études antérieures ayant testé les effets de l'absence ou de la présence d'une bande dérasée sur le comportement de dépassement (Beck et al., 2019, Parkin & Meyers, 2010, Mecheri et al., 2020), il était attendu que la redistribution du profil en travers modifie la perception qu'ont les conducteurs de leur environnement routier, et que cette perception influence les comportements de dépassement en dépit de contraintes spatiales identiques. Plus spécifiquement, il était attendu que les participants contrôlent leur locomotion davantage au regard des limites de leur voie que des besoins du cycliste sur la route redistribuée (lorsque le cycliste est dans la bande dérasée), et réalisent dans cette condition des dépassements avec une inter-distance latérale plus réduite et à plus grande vitesse dans les deux directions.

4.1. Méthode

Les participants ont conduit sur deux routes rurales expérimentales (Figure 22) : (i) une route contrôle (voie de 3,50 m, sans bande dérasée), et (ii) une route correspondant à une redistribution de cette route contrôle (voie de 2,75 m adjacente à une bande dérase de 0.75 m). Dans les deux routes expérimentales, les cyclistes ont été positionnés à 0.25 m du bord extérieur de la route. La largeur de la voie a été déterminé sur la base de la largeur de voie la plus courante en France sur routes bidirectionnelles (i.e., 3.50 m, voir Hall et al., 1998). La largeur de la bande dérasée a été déterminée à partir de la réglementation française pour les bandes dérasées multifonctionnelles permettant la pratique cycliste (largeur minimale = 0,75 m). Pour chaque route expérimentale, les participants ont négocié 14 virages en présence d'un cycliste (7 dans chaque direction) et 14 virages en l'absence de cycliste (7 dans chaque direction). Leur position longitudinale a été assignée de façon randomisée pour chaque route expérimentale mais était constante entre les participants. Chaque participant a effectué une session de conduite sur chaque route expérimentale, ce qui a produit 7 répétitions pour chaque direction de virage (gauche, droite) et chaque situation de conduite (absence, présence d'un cycliste). Chaque session de conduite a duré environ 18 minutes, en fonction de la vitesse de conduite du participant.

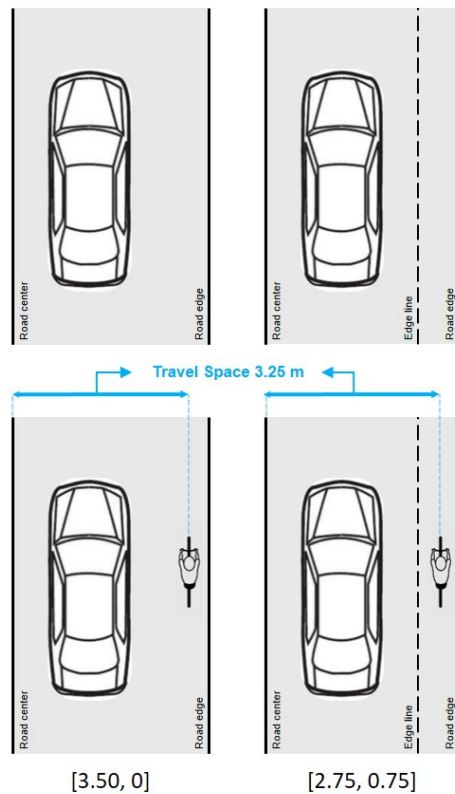


Figure 22. Représentation schématique de la route contrôlée (gauche) et de la route distribuée (droite) avec un cycliste circulant à 0.25 m du bord extérieur de la route. Les contraintes spatiales (travel space) étaient identiques entre les deux conditions expérimentales (3.25 m).

4.2. Analyse statistique

L'analyse statistique visait à déterminer si la configuration routière avait un effet sur les manœuvres de dépassement réalisées par les participants, caractérisées au moyen de l'inter-distance latérale, la vitesse de dépassement et la différence de position latérale. Les manœuvres de dépassement ont été évaluées à l'aide de tests t pour échantillons appariés (ou de tests Wilcoxon W, en fonction de la distribution des variables) entre les deux configurations routières pour chaque direction de virage, avec les tailles d'effets exprimées par le d de Cohen. Les statistiques descriptives ont été reportées avec moyennes et écarts-types (moyenne \pm EC).

4.3. Résultats et discussion

Localisation spatiale des dépassements

Pour limiter les variations de localisation longitudinale entre les manœuvres de dépassements analysées, il a été décidé d'exclure tous les participants dont les localisations moyennes individuelles étaient supérieures ou inférieures d'un écart-type à la localisation moyenne de l'échantillon. En appliquant cette procédure, les données de trois participants ont été exclues, ce qui a permis d'obtenir un échantillon final de 20 participants. Après exclusion, la localisation moyenne des dépassements (relativement à l'entrée du virage) était de -20 ± 9 m à l'approche des virages à gauche et 100 ± 10 m au milieu des virages à droite.

Vitesse, inter-distance latérale et différence de position latérale

La Figure 23 représente la vitesse de dépassement et l'inter-distance latérale de dépassement à l'approche des virages à gauche et dans les virages à droite en fonction de la largeur de voie.

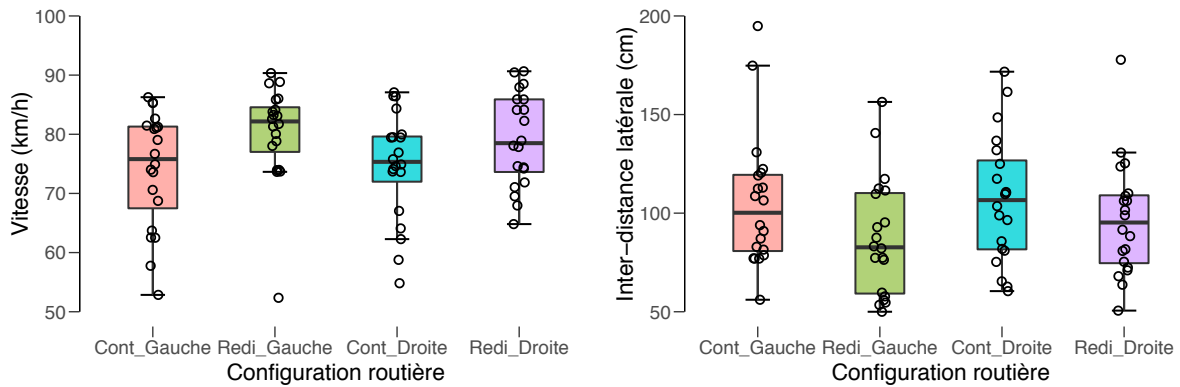


Figure 23. Vitesse de dépassement (à gauche) et inter-distance latérale (à droite) en fonction de la configuration routière (cont = route contrôle, redi = route redistribuée).

La vitesse de dépassement a été influencée significativement par la configuration routière à l'approche des virages à gauche ($W_{19} = 18.00, p < .001, d = -0.84$), mais pas dans les virages à droite ($W_{19} = 64.00, p = .13$). A l'approche des virages à gauche, les participants ont dépassé les cyclistes positionnés sur la bande dérasée (80 ± 8 km/h) à une plus grande vitesse que les cyclistes positionnées dans la voie (74 ± 9 km/h).

Les inter-distances latérales de dépassement se distinguaient significativement entre les deux configurations routières à l'approche des virages à gauche et dans les virages à droite (gauche : $t_{19} = 3.80, p < .001, d = 0.85$; droite : $W_{19} = 163.00, p = .03, d = 0.49$). Dans les deux directions de virage, l'inter-distance latérale de dépassement était plus importante pour les cyclistes positionnés dans la voie que pour les cyclistes positionnés dans la bande dérasée ([2,75, 0,75]-gauche = 88 ± 30 cm ; [3,50, 0]-gauche = 105 ± 34 cm ; [2,75, 0,75]-droite = 97 ± 29 cm ; [3,50, 0]-droite = 107 ± 32 cm).

Concernant la différence de position latérale, la Figure 24 montre que les participants, en comparaison de la position qu'ils ont adopté dans le virage en l'absence de cycliste, ont tous opéré un dégagement latéral dans la direction opposée à celle du cycliste pour réaliser le dépassement. La différence de position latérale a été influencée par la configuration routière dans les deux directions (gauche : $t_{19} = 6.62, p < .001, d = 1.48$; droite : $W_{19} = 3.00, p < .001, d = -1.17$). A l'approche des virages à gauche, la différence de position latérale était plus importante dans la route contrôle (117 ± 40 cm) que dans la route redistribuée (68 ± 30 cm). Dans les virages à droite, un plus grand effort de dégagement était également réalisé dans la route contrôle (-116 ± 33 cm) que dans la route redistribuée (-76 ± 25 cm).

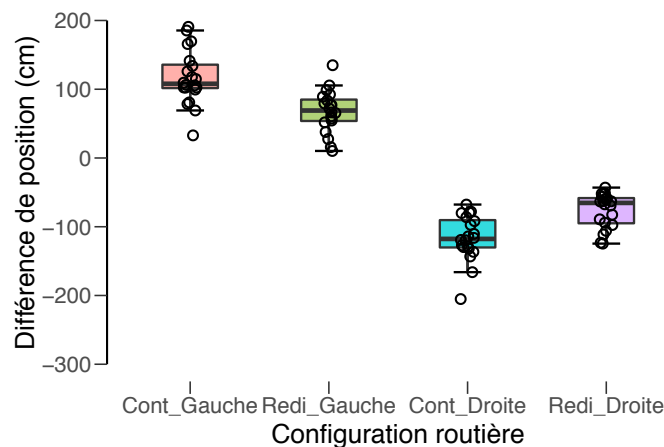


Figure 24. Différence de position latérale dans la route contrôle et dans la route redistribuée (cont = route contrôle, redi = route redistribuée).

En résumé, les résultats ont montré que la configuration routière a eu une influence très forte sur le comportement de dépassement en impactant de manière significative l'inter-distance latérale et la différence de position latérale dans les deux directions de virage, alors même que les contraintes spatiales étaient identiques. Concernant la vitesse de dépassement, elle était similaire entre les deux configurations routières dans les virages à droite mais significativement inférieure dans la route redistribuée à l'approche des virages à gauche.

Ainsi, à l'approche des virages à gauche, les effets d'un cycliste circulant dans la bande dérasée (sur la route redistribuée) plutôt que dans la voie de circulation (sur la route contrôle) pour une même contrainte spatiale (3.25 m) a produit exactement les mêmes effets chez les participants que ceux qui ont été antérieurement observés dans les sections droites (Beck et al., 2019 ; Mecheri et al., 2020 ; Parkin & Meyers, 2010). En effet, les participants ont produit des manœuvres de dépassement moins bien préparées (moins de décélération en approche du cycliste) et moins bien exécutées (moins de dégagement latéral vers la gauche) lorsque les cyclistes circulaient dans la bande dérasée, probablement en raison d'une absence d'engagement conscient dans la manœuvre de dépassement lorsque le flux cycliste est mis en séparation.

En revanche, dans les virages à droite, bien que les participants ont adopté une plus grande inter-distance latérale lorsque le cycliste circulait dans la voie de circulation, ils n'ont pas adapté leur vitesse de dépassement, ce qui marque une différence avec les comportements observés dans les études antérieures en ligne droite. Les participants semblent donc peu enclins, lorsqu'ils sont déjà engagés dans la courbe, à ralentir la vitesse avec laquelle ils négocient le virage lorsqu'un cycliste est positionné dans leur voie de circulation. La raison d'un tel comportement tient possiblement au fait que les vitesses adoptées par les participants dans les virages à droite étaient inférieures à celle adoptées lors de l'approche des virages à gauche, et que cette vitesse était peut-être perçue par eux comme suffisamment basse pour appréhender la manœuvre de dépassement en toute prudence quelle que fut la situation de conduite.

5. Discussion générale

Les analyses menées dans cette cinquième étude avaient pour objectif d'examiner, d'une part, l'effet de la largeur de la voie (qui avait pour conséquence de faire varier les contraintes spatiales) et d'autre part, l'effet de la configuration routière (qui maintenait les contraintes spatiales inchangées) sur le comportement de dépassement d'un cycliste circulant (ou non) sur la bande dérasée.

Concernant la vitesse de dépassement, les participants ont adapté leur vitesse sous l'effet d'une réduction de la largeur de voie (Exp. 1) et sous l'effet d'une manipulation de la configuration routière à l'approche des virages à gauche (Exp. 2), mais ont gardé leur vitesse inchangée au milieu des virages à droite quelles que furent les circonstances. Ces résultats semblent marquer une différence dans la façon dont les conducteurs appréhendent la manœuvre de dépassement en fonction qu'elle s'opère à l'approche ou à l'intérieur de la courbe. Une proposition explicative est que la vitesse à laquelle roulaient les participants à l'intérieur des virages à droite, qui était inférieure à celle adoptée à l'approche des virages à gauche, était suffisamment modérée pour qu'ils considèrent que ce levier ne nécessitait pas d'être ajusté davantage pour réaliser prudemment la manœuvre de dépassement.

Concernant la largeur de voie, les résultats ont indiqué que les participants n'ont pas opéré d'effort de dégagement supplémentaire dans la voie de 3.50 m durant l'approche des virages à gauche alors qu'ils disposaient pourtant d'une chaussée bien plus large pour le faire. Ils ont toutefois agi sur la vitesse de dépassement dans cette situation, en adoptant une vitesse plus réduite à l'approche des virages à gauche dans la voie de 2.75 m. Les participants semblent donc peu enclins à adopter un plus grand dégagement latéral lorsqu'ils sont en approche des virages à gauche et optent pour un ralentissement lorsque les contraintes spatiales s'élèvent. Dans les virages à droite, au contraire, les participants ont gardé leur vitesse de dépassement inchangée entre les deux largeurs de voie mais ont adapté leur dégagement latéral aux contraintes imposées par la largeur de la voie en produisant

un plus grand effort de dégagement dans la voie de 3.50 m. L'élargissement d'une voie en situation réelle présenterait donc l'intérêt de faire émerger des plus grandes inter-distance latérales de dépassement qui ne seraient pas seulement dues à une augmentation de la distance séparant le cycliste du centre de la route mais aussi à une transformation du comportement de dépassement, augmentant ainsi le niveau de sécurité des cyclistes.

Du point de vue de la configuration routière, les résultats ont montré, alors même que les contraintes spatiales étaient identiques, que la présence du cycliste dans la voie de circulation ou dans la bande dérasée a transformé de façon profonde le comportement de dépassement. Lorsque les cyclistes se trouvaient dans la voie de circulation, les participants ont adopté une inter-distance latérale de dépassement significativement plus importante (à l'approche des virages à gauche et dans les virages à droite) et une vitesse significativement inférieure (seulement à l'approche des virages à gauche) en comparaison des situations dans lesquelles les cyclistes se trouvaient dans la bande dérasée. Au plan applicatif, ces résultats sont particulièrement importants dans la mesure où ils renseignent sur l'interaction automobiliste-cycliste dans des configurations routières similaires à celles retrouvées avant/après redistribution du profil en travers. Ils mettent en lumière que la redistribution du profil en travers transforme le comportement de dépassement pour des interactions automobilistes-cyclistes potentiellement plus risquées (plus grande vitesse et inter-distance latérale de dépassement moyenne inférieure à 1m). Toutefois, l'aménagement d'une bande dérasée par redistribution du profil en travers a une propriété importante pour permettre la circulation des cyclistes en cela qu'il permet une mise en séparation (non physique) des flux automobilistes et cyclistes à bas coût. Les résultats de cette étude amènent donc à considérer que l'aménagement d'une bande dérasée multifonctionnelle par la redistribution du profil en travers, opérée dans l'objectif de fournir un espace de circulation aux cyclistes, doit faire l'objet d'expérimentations sur routes réelles avant d'être fermement recommandée.

Points à retenir

- A l'approche des virages à gauche, les participants adaptent leur vitesse de dépassement en fonction de la largeur de voie mais pas leur effort de dégagement latéral.
- A l'intérieur des virages à droite, les participants utilisent l'espace supplémentaire offert par une voie plus large pour produire un plus grand effort de dégagement latéral mais n'adaptent pas leur vitesse de dépassement.
- La comparaison avant-après redistribution du profil en travers montre une transformation profonde de la manœuvre de dépassement selon que le cycliste circule dans la voie ou dans la bande dérasée alors même que les contraintes spatiales sont identiques.
- Une route dont le profil en travers a été redistribué, en comparaison d'une route contrôle, donne lieu à des interactions automobiliste-cycliste potentiellement plus risquées bien qu'elle permette une mise en séparation du flux cycliste.

Références bibliographiques

- Beck, B., Chong, D., Olivier, J., Perkins, M., Tsay, A., Rushford, A., Li, L., Cameron, P., Fry, R., & Johnson, M. (2019). How much space do drivers provide when passing cyclists? Understanding the impact of motor vehicle and infrastructure characteristics on passing distance. *Accident Analysis & Prevention, 128*, 253–260.
- Bella, F. (2008). Driving simulator for speed research on two-lane rural roads. *Accident Analysis & Prevention, 40*(3), 1078–1087.
- Bella, F. (2013). Driver perception of roadside configurations on two-lane rural roads: Effects on speed and lateral placement. *Accident Analysis & Prevention, 50*, 251–262.
- Bella, F., & Silvestri, M. (2017). Interaction driver–bicyclist on rural roads: effects of cross-sections and road geometric elements. *Accident Analysis & Prevention, 102*, 191–201.
- Ben-Bassat, T., & Shinar, D. (2011). Effect of shoulder width, guardrail and roadway geometry on driver perception and behavior. *Accident Analysis & Prevention, 43*(6), 2142–2152.
- Blana, E. (1996). *A survey of driving research simulators around the world*. ITS Working paper No. 481. Leeds, England: University of Leeds.
- Boer, E. R. (1996). Tangent point oriented curve negotiation. In *IEEE Proceedings of the 1996 Intelligent Vehicles Symposium. Proceedings of the 1996 IEEE* (pp. 7–12). Piscataway, NJ: IEEE Service Center.
- Burnett, G. E., Irune, A., & Mowforth, A. (2007). Driving simulator sickness and validity: how important is it to use real car cabins? *Advances in Transportation Studies, 33–42*.
- Caird, J. K., Horrey, W. J. (2011). Twelve Practical and Useful Questions About Driving Simulation. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird, and J. D. Lee (Eds.), *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (pp. 5-1–5-18). CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Carsten, O., & Jamson, A. H. (2011). Driving simulators as research tools in traffic psychology. In B. E. Porter (Ed.), *Handbook of Traffic Psychology* (pp. 87–96). Academic Press, London.
- Carter, C. J., & Laya, O. (1998). Drivers' visual search in a field situation and in a driving simulator. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles VI*, Elsevier, Amsterdam (1998), pp. 21-31.
- Chatziastros, A., Wallis, G. M., & Bülhoff, H. H. (1999). The effect of field of view and surface texture on driver steering performance. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles VII*, Elsevier, Amsterdam (1999), pp. 253-259.
- Charlton, S. G., & de Pont, J. J. (2007). Curve speed management, Land Transport New Zealand Research, Report N° 323, Wellington, New Zealand.
- Coutton-Jean, C., Mestre, D. R., Goulon, C., & Bootsma, R. J. (2009). The role of edge lines in curve driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 12*(6), 483–493.
- Davidse, R., van Driel, C., & Goldenbeld, C. (2004). The effect of altered road markings on speed and lateral position. *SWOV Institute for Road Safety Research, The Netherlands*.
- De Waard, D., Van der Hulst, M., Hoedemaeker, M., & Brookhuis, K. A. (1999). Reply to comments on “Driver behavior in an emergency situation in the Automated Highway System”. *Transportation Human Factors, 1*, 87–89.
- Dijksterhuis, C., Brookhuis, K. A., & De Waard, D. (2011). Effects of steering demand on lane keeping behaviour, self-reports, and physiology. A simulator study. *Accident Analysis & Prevention, 43*(3), 1074–1081.

- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behavior. *Human Factors*, 20(6), 691–707.
- ERSO (European Road Safety Observatory). (2015). Traffic Safety Basic Facts on Single Vehicle Accidents, European Commission, Directorate General for Transport, June 2015.
- Farber, E. (1999). Comments on “Driver behavior in an emergency situation in the Automated Highway System”. *Transportation Human Factors*, 1, 83–86.
- Franchak, J. M., Celano, E. C., & Adolph, K. E. (2012). Perception of passage through openings depends on the size of the body in motion. *Experimental Brain Research*, 223(2), 301–310.
- García, A., Domènech, A.A., Llorca, C., Gómez, F.A., & Ferrer, V. (2015). Effects of road geometry on the interaction between cyclist and vehicles on two-lane rural roads. In: 5th International Symposium on Highway Geometric Design.
- Glennon, J. C., Neuman, T. R., & Leisch, J. E. (1985). Safety and operational considerations for design of rural highways curves (Publication No. FHWA-RD-86-035). Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Godthelp, H. (1988). The limits of path error-neglecting in straight lane driving. *Ergonomics*, 31(4), 609–619.
- Godley, S. T., Triggs, T. J., & Fildes, B. N. (2002). Driving simulator validation for speed research. *Accident Analysis & Prevention*, 34(5), 589–600.
- Green, P., Lin, B., & Bagian, T. (1994). Driver workload as a function of road geometry: a pilot experiment. Technical Report UMTRI-93-39/GLCTTR 22-91/01. Ann Arbor, MI: University of Michigan Transportation Research Institute, 1001(48), 109.
- Hadi, M. A., Aruldas, J., Chow, L.-F., Wattleworth, J. A. (1995). Estimating safety effects of cross-section design for various highway types using negative binomial regression. *Transp. Res. Rec.* 1500, 169-177.
- Harkey, D., & Stewart, J. (1997). Evaluation of shared-use facilities for bicycles and motor vehicles. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1578), 111–118.
- Hall, L.E., Powers, R.D., Turner, D.S., Brilon, W., Hall, J.W. (1998). Overview of cross section design elements. In: International Symposium on Highway Geometric Design Practices, Boston, 12:1-12.
- Higuchi, T., Cinelli, M. E., Greig, M. A., & Patla, A. E. (2006). Locomotion through apertures when wider space for locomotion is necessary: adaptation to artificially altered bodily states. *Experimental Brain Research*, 175(1), 50–59.
- Hummer, J. E., Rasdorf, W., Findley, D. J., Zeeger, C. V., & Sundstrom, C. A. (2010). Curve collisions : road and collisions characteristics and countermeasures. *Journal of Transportation Safety and Security*, 2(3), 203–210.
- IISR (2019). Instruction Interministérielle sur la Signalisation Routière. Septième partie : marque sur chaussées (Arrêté modificatif du 12 décembre 2018). JO du 9 janvier 2019. *Journaux Officiels, les éditions des journaux officiels*, Paris, France.
- Johnston, I. R. (1982). Modifying driver behaviour on rural road curves: A review of recent research. *Proceedings 11th Australian Road Research Board (ARRB) Conf., Vol. 11, ARRB Group Limited*, 115–124.
- Kandil, F. I., Rotter, A., & Lappe, M. (2010). Car drivers attend to different gaze targets when negotiating closed vs. open bends. *Journal of Vision*, 10(4), 24.
- Kappé, B., van Erp, J., & Korteling, J. H. (1999). Effects of head-slaved and peripheral displays on lane-keeping performance and spatial orientation. *Human Factors*, 41(3), 453–466.

- Karlaftis, M. G., Golias, I. (2002). Effects of road geometry and traffic volumes on rural roadway accident rates. *Accid. Anal. Prev.* 34(3), 357–365. doi:10.1016/S0001-4575(01)00033-1
- Kay, J. J., Savolainen, P. T., Gates, T. J., & Datta, T. K. (2014). Driver behavior during bicycle passing maneuvers in response to a Share the Road sign treatment. *Accident Analysis & Prevention*, 70, 92–99.
- Klüver, M., Herrigel, C., Heinrich, C., Schöner, H.-P., & Hecht, H. (2016). The behavioral validity of dual-task driving performance in fixed and moving base driving simulators. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 37, 78–96.
- Kountouriotis, G. K., Floyd, R. C., Gardner, P. H., Merat, N., & Wilkie, R. M. (2012). The role of gaze and road edge information during high-speed locomotion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38, 687–702.
- Land, M. F., & Horwood, J. (1995). Which parts of the road guide steering? *Nature*, 377(6547), 339–340.
- Land, M. F., & Lee, J. (1994). Where we look when we steer. *Nature*, 369(6483), 742–744.
- Leonard, J., Bilsle, D., & Recker, W. (1994). Super-elevation rates at rural highways intersections. *Rep No. RTA-53P434, Univ. of Carolina, Institute of Transportation Studies, Irvine CA.*
- Lewis-Evans, B., & Charlton, S. G. (2006). Explicit and implicit processes in behavioural adaptation to road width. *Accident Analysis & Prevention*, 38(3), 610–617.
- Liu, A., & Chang, S. (1995). Force feedback in a stationary driving simulator. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 1711–1716. Vancouver, BC, Canada.
- Love, D. C., Breaud, A., Burns, S., Margulies, J., Romano, M., & Lawrence, R. (2012). Is the three-foot bicycle passing law working in Baltimore, Maryland? *Accident Analysis & Prevention*, 48, 451–456.
- Lum, H.S. (1984). The use of road markings to narrow lanes for controlling speed in residential areas. *Inst. Transp. Eng.* 54(6), 50–53.
- Mars, F. (2008). Driving around bends with manipulated eye-steering coordination. *Journal of Vision*, 8(11), 1-11.
- Mecheri, S., & Lobjois, R. (2018). Steering control in a low-cost driving simulator: A case for the role of virtual vehicle cab. *Human Factors*, 60, 719–734.
- Mecheri, S., Rosey, F., & Lobjois, R. (2017). The effects of lane width, shoulder width, and road cross-sectional reallocation on drivers' behavioral adaptations. *Accident Analysis & Prevention*, 104, 65–73.
- Mecheri, S., Rosey, F., & Lobjois, R. (2020). Manipulating constraints on driver-cyclist interactions in a fixed travel space: Effects of road configuration on drivers' overtaking behavior. *Safety Science*, 123, 1–11.
- Mole, C. D., Kountouriotis, G., Billington, J., & Wilkie, R. M. (2016). Optic flow speed modulates guidance level control: New insights into two-level steering. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42(11), 1818–1838.
- Mourant, R. R., & Sadhu, P. (2002). Evaluation of force feedback steering in a fixed based driving simulator. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 46, No. 26, pp. 2202-2205). Baltimore, U.S.A.
- Nagayama, Y., Morita, T., Miura, T., Watanabem, J., & Murakami, N. (1980). *Motorcyclists' visual scanning pattern in comparison with automobile drivers* (Technical Paper 790262). Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

- Park, G. D., Allen, R. W., Rosenthal, T. J., & Fiorentino, D. (2005). Training effectiveness: How does driving simulator fidelity influence driver performance? In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 49, No. 25, pp. 2201-2205). Orlando, U.S.A.
- Parkin, J., & Meyers, C. (2010). The effect of cycle lanes on the proximity between motor traffic and cycle traffic. *Accident Analysis & Prevention*, 42(1), 159–165.
- Pucher, J., & Dijkstra, L. (2003). Promoting safe walking and cycling to improve public health: lessons from the Netherlands and Germany. *American Journal of Public Health*, 93(9), 1509–1516.
- Pucher, J., Buehler, R., & Seinen, M. (2011). Bicycling renaissance in North America? An update and re-appraisal of cycling trends and policies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(6), 451–475.
- Raw, R. K., Kountouriotis, G. K., Mon-Williams, M., & Wilkie, R. M. (2012). Movement control in older adults: does old age mean middle of the road? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(3), 735.
- Readinger, W. O., Chatziastros, A., Cunningham, D. W., Bühlhoff, H. H., & Cutting, J. E. (2002). Gaze-eccentricity effects on road position and steering. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 8(4), 247–258.
- Reed, M., & Green, P. (1999). Comparison of driving performance on-road and in a low-cost simulator using a concurrent telephone dialing task. *Ergonomics*, 42(8), 1015–1037.
- Robertshaw, K. D., & Wilkie, R. M. (2008). Does gaze influence steering around a bend? *Journal of Vision*, 8(4), 1-13.
- Rosey, F., Auberlet, J.-M. (2012). Trajectory variability: Road geometry difficulty indicator. *Saf. Sci.* 50(9), 1818–1828. doi:10.1016/j.ssci.2012.04.003
- Rosey, F., & Auberlet, J.-M. (2014). Driving simulator configuration impacts drivers' behavior and control performance: An example with studies of a rural intersection. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 99–111.
- Rosey, F., Auberlet, J.-M., Moisan, O., Dupré, G. (2009). Impact of narrower lane width: Comparison between fixed-base simulator and real data. *Transp. Res. Rec.* 2138, 112–119. doi:10.3141/2138-15
- Salvucci, D. D., & Gray, R. (2004). A two-point visual control model of steering. *Perception*, 33(10), 1233–1248.
- Santos, J., Merat, N., Mouta, S., Brookhuis, K., & De Waard, D. (2005). The interaction between driving and in-vehicle information systems: Comparison of results from laboratory, simulator and real-world studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 135–146.
- SETRA. (2008). *Savoirs de base en sécurité routière - novembre 2008 - L'accotement revêtu - Savoirs et savoir-faire*. Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements, Bagneux, France.
- Shackel, S. C., & Parkin, J. (2014). Influence of road markings, lane widths and driver behaviour on proximity and speed of vehicles overtaking cyclists. *Accident Analysis & Prevention*, 73, 100–108.
- Stoffregen, T. A., Bardy, B. G., Smart, L. J., Pagulayan, R. (2003). On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments. In L. J. Hettinger and M. W. Haas (Eds), *Virtual and Adaptive Environments* (pp. 111–128). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Stone, M., & Broughton, J. (2003). Getting off your bike: cycling accidents in Great Britain in 1990–1999. *Accident Analysis & Prevention*, 35(4), 549–556.

- Vansteenkiste, P., Cardon, G., D'Hondt, E., Philippaerts, R., & Lenoir, M. (2013). The visual control of bicycle steering: The effects of speed and path width. *Accident Analysis and Prevention*, *51*, 222–227.
- Vansteenkiste, P., Van Hamme, D., Veelaert, P., Philippaerts, R., Cardon, G., & Lenoir, M. (2014). Cycling around a curve: The effect of cycling speed on steering and gaze behavior. *PloS One*, *9*(7), e102792.
- Waard, D.D.E., Jessurun, M., Steyvers, F.J.J.M., Reggatt, P.T.F., Brookhuis, K.A. (1995). Effect of road layout and road environment on driving performance, drivers' physiology and road appreciation. *Ergon*. *38*(7), 1395–1407. doi:10.1080/00140139508925197
- Walker, I. (2007). Drivers overtaking bicyclists: Objective data on the effects of riding position, helmet use, vehicle type and apparent gender. *Accident Analysis & Prevention*, *39*(2), 417–425.
- Warren, W. H., & Fajen, B. R. (2004). From optic flow to laws of control. In: L.M. Vaina, S.A. Beardsley, S. Rushton (Eds.), *Optic Flow and Beyond*, Springer, Kluwer, pp. 307-337.
- Warren, W. H., & Whang, S. (1987). Visual guidance of walking through apertures: body-scaled information for affordances. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *13*(3), 371-383.
- Wilkie, R. M., & Wann, J. P. (2003). Eye-movements aid the control of locomotion. *Journal of Vision*, *3*(11), 677-84.
- Wilkie, R. M., Wann, J. P., & Allison, R. S. (2008). Active gaze, visual look-ahead, and locomotor control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *34*(5), 1150-1164.
- Wilkie, R. M., Kountouriotis, G. K., Merat, N., & Wann, J. P. (2010). Using vision to control locomotion: Looking where you want to go. *Experimental Brain Research*, *204*, 539-547.
- Yan, X., Abdel-Aty, M., Radwan, E., Wang, X., & Chilakapati, P. (2008). Validating a driving simulator using surrogate safety measures. *Accident Analysis & Prevention*, *40*(1), 274–288.
- Zegeer, C.V., Council, F.M. (1995). Safety relationships associated with cross-sectional roadway elements. *Transportation Research Record*, *1515*, 29–35.
- Zegeer, C. V., Stewart, R., Council, F., & Neuman, T. R. (1994). Accident relationships of roadway width on low-volume roads. *Transportation Research Record*, *1445*, 160–168.