



## L4.2 Description détaillée des scénarios d'interaction VA / VL et des risques associés

<b>Work Package</b>	4
<b>Responsable du WP, affiliation</b>	<i>SAINT PIERRE G., CEREMA</i>
<b>Livable n°</b>	<i>L4.2</i>
<b>Version</b>	<i>Finale</i>
<b>Auteur responsable du livrable</b>	<i>SAINT PIERRE G., CEREMA</i>
<b>Auteurs, affiliations</b>	<i>DÉSIRÉ L., SAINT PIERRE G., CEREMA CHAUVEL C., HAUE, JB., LAB WADJI F., KROGER R., THIOLON G., CEESAR JUDALET V., ESTACA</i>
<b>Relecteurs, affiliations</b>	<i>LESIRE P., STELLANTIS</i>
<b>Statut du livrable</b>	<i>Pour validation finale</i>

## Veillez citer ce document de cette façon :

Saint Pierre, G., Désiré, L., Judalet, V., Chauvel, C., Haue, JB., Wadji, F., Kroger, R., Tholon, JB., (2022) Livrable 4.2 **Description détaillée des scénarios d'interaction VA / VL et des risques associés**, Projet Surca, financé par la FSR et la DSR, 90 p.

## Historique des versions

Version	Date	Auteurs	Type des changements
V0	19/10/2021	G. Saint Pierre	draft avec plan
V3	06/04/2022	G. Saint Pierre	Fusion des contributions
V4	13/06/2022	Lara Désiré	Corrections
V5	28/06/2022	G. Saint Pierre & Lara Désiré	Corrections finales avant review
Finale	22/07/2022	G. Saint Pierre	Corrections suite à review

## Remerciements

Le Projet SURCA est financé par la dévolution de la Fondation Sécurité Routière, la Délégation à la sécurité routière et pour moitié par les partenaires du projet.



## Résumé du projet Surca

Les questions posées par la cohabitation de véhicules de plus en plus automatisés avec des véhicules conventionnels et des usagers vulnérables, cyclistes, piétons, deux-roues motorisés, sont au cœur des préoccupations des décideurs publics, constructeurs, ou spécialistes de l'infrastructure routière et de la sécurité routière. Tous ont l'espoir que ces nouvelles technologies contribuent à améliorer la sécurité routière. L'objectif global du projet « Sécurité des Usagers de la Route et Conduite Automatisées, SURCA » est de contribuer à une meilleure intégration de la Conduite Automatisée dans la circulation actuelle.

Les partenaires du projet (Ifsttar(Uni Eiffel), DSR, Ceesar, Cerema, Vedecom, Lab), ont ainsi comme objectif d'identifier quelles interactions existent et quelles stratégies pertinentes sont mises en place par les conducteurs pour proposer des recommandations aux concepteurs de véhicules automatisés (VA) sur les besoins en termes d'interactions et en termes de comportement du véhicule autonome. Pour cela, il est prévu d'analyser des bases de données existantes sur la conduite des véhicules conventionnels et d'identifier les facteurs qui peuvent expliquer des comportements différents.

Les connaissances issues de ces bases seront utilisables pour simuler l'introduction de la conduite automatisée de niveaux 3, 4 et 5, avec des taux de pénétration faibles. La gestion des interactions avec les autres usagers doit être réalisée dès que le véhicule peut évoluer en autonomie sans supervision du conducteur, quelles que soient la durée et les sections sur lesquelles cette automatisation sera possible. En cas de taux de pénétration très important, d'autres types d'interactions risquent de se mettre en place et devront alors être étudiés.

Ce projet est articulé autour de deux sous-thématiques :

- L'identification des scénarios d'interaction entre VA et autres usagers de la route (véhicules conventionnels, deux roues motorisés, cyclistes, piétons), avec un focus particulier sur les personnes âgées :
  - Etude des situations de négociation où les conducteurs gèrent cette interaction humaine, à partir de bases de données de conduite conventionnelle, et en utilisant des éléments difficilement émis et perçus par les systèmes automatisés (regard, connaissance a priori d'intention, etc.),
  - Etude de la réaction des autres usagers face à un véhicule autonome alors que son conducteur est absorbé dans une tâche annexe,
  - Identification des besoins de communication du véhicule autonome en phase active avec les autres usagers,
  - Analyse des besoins des usagers âgés et acceptabilité sociétale du véhicule autonome.
- L'étude des impacts de la posture des occupants (conducteur et passagers) d'un véhicule en mode autonome sur le risque lésionnel :
  - Choix des scénarios de simulation : positions des occupants, conditions de choc (lors de la réalisation de tâches annexes) et systèmes de retenue,
  - Evaluation des lésions potentielles par simulations numériques en fonction des systèmes de retenue (par ex. déploiement d'air bag),
  - Recommandations en termes de postures acceptables selon les différents systèmes de retenue.

## Résumé du Livrable L4.2

Les travaux menés dans cette tâche ont cherché à identifier les nouveaux risques éventuels liés à l'introduction des véhicules automatisés (VA) dans le trafic. Pour cela, de nombreuses sources de données de conduite issues de précédents travaux ont été analysées pour comprendre les facteurs agissants sur la survenue de situations de conduites à risque. En préalable une réflexion (Livrable L4.1 : Sélection des scénarios d'interaction qui seront retenus pour les analyses plus fines) a été menée par un collectif d'expert du véhicule automatisé et de l'accidentologie pour identifier les scénarios de conduites à fort enjeu du point de vue de la sécurité routière des VA. Au terme de ce travail, deux situations de conduite semblent prioritaires pour des analyses plus poussées :

- Les situations de déboisement, rabattement et insertions.
- Les manœuvres d'arrêt.

Chacune de ces situations de conduite a été recherchée, soit dans des bases de données (BDD) de conduite recueillies en situation naturelle (BDD Moove-Vedecom, BDD UDrive-CEESAR, BDD Cerema-Uni Eiffel), soit dans des études détaillées d'accidents (LAB).

Le plan de présentation des travaux suit donc ce cheminement, un chapitre pour chaque situation de conduite, et une partie pour chaque type de données analysées.

La première situation étudiée concerne les situations de déboisement, rabattement et insertions. Dans ce contexte, les études menées à partir de données de conduite en situation naturelle ont adopté deux méthodologies complémentaires. La première, sur les données MOOVE, est une approche statistique visant à décrire les situations observées dans leur ensemble, en cherchant à déterminer les caractéristiques des comportements humains et les confronter aux conditions d'opérations du véhicule autonome. Les résultats obtenus concernent plus de 10 000 manœuvres de changement de voie par des véhicules légers (VL) réalisées juste devant les véhicules équipés MOOVE. Cela correspond à des manœuvres de rabattement quand le véhicule vient de voie de gauche, et d'insertion quand il vient de la voie de droite. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- Les temps inter véhiculaire (TIV) au moment du changement de voie (insertion et rabattement confondus) sont majoritairement inférieurs à 2 secondes. Ils sont même inférieurs à 0.6 seconde dans 10% des scènes étudiées.
- Les véhicules qui se rabattent ont une vitesse généralement supérieure au véhicule MOOVE, et ils semblent garder cette vitesse après la manœuvre.
- Lors des insertions, la vitesse relative des véhicules qui effectuent le changement de voie est généralement négative. Cependant, les véhicules impliqués (celui qui change de voie ou le véhicule Ego) semblent adapter leur vitesse au cours de la manœuvre si bien que leurs vitesses relatives après le changement de voie se sont réduites.
- Lorsque le véhicule qui s'insère roule à la même vitesse que le véhicule Ego (ou plus vite), l'adaptation de la vitesse du véhicule Ego est très limitée, même pour des temps inter véhiculaire très faibles. La décélération est perceptible uniquement pour des vitesses relatives négatives, avec un TIV inférieur ou égal à 1,5 secondes.
- Dans le cas particulier des insertions sur voie d'insertion, nous avons pu mettre en évidence que les conducteurs présents sur la voie côtoyant la voie d'insertion adaptent la distance avec le véhicule qui les précède pour permettre aux véhicules présents sur la voie d'insertion de s'insérer.

Ainsi, afin d'adopter un comportement de conduite en sécurité un véhicule automatisé (VA) qui effectue un changement de voie devrait adapter sa vitesse pour qu'elle soit supérieure ou égale à celle du véhicule devant lequel il s'insère et laisser un temps inter-véhiculaire de 2 secondes avec ce véhicule

La seconde approche exploite la qualité des données UDrive pour rechercher, parmi les deux situations de conduite identifiées, celles qui relèvent de situations risquées et qui de ce fait pourraient déclencher une alerte de sécurité pour un véhicule autonome. La faible quantité d'évènements identifiés autorise une analyse détaillée de l'évolution d'une telle situation. Ces analyses mettent en évidence la capacité des conducteurs humains à réagir et collaborer en adaptant leurs comportements à des manœuvres dangereuses des autres véhicules.

L'étude détaillée de trois accidents survenus en situation d'insertion et/ou de rabattement font état du rôle joué par le non-respect des distances et temps inter-véhiculaire de sécurité. Ainsi, ces études incitent à recommander des comportements préventifs au futur véhicule autonome :

- Limiter la décélération maximale du véhicule autonome quand il subit un cut-in serré pour éviter de surprendre le véhicule suiveur.
- Si un véhicule roulant sur une voie d'insertion semble vouloir s'insérer devant un véhicule autonome, celui-ci doit adapter son inter-distance avec le véhicule qui le précède pour faciliter l'insertion

Enfin, le livrable présente les résultats des études menées pour étudier les manœuvres d'arrêt, d'un point de vue statistique d'abord, puis dans le détail via l'étude de quelques accidents.

Du point de vue statistique, une étude a extrait plus de 2500 situations de décélérations avant un arrêt du véhicule à partir des BDD de conduite en situation naturelle. Leur description montre une hétérogénéité des comportements humains selon l'infrastructure qui est la cause probable de l'arrêt. Ainsi, en présence de stops, les conducteurs ont tendance à adopter des vitesses d'approche plus élevées suivies d'un freinage plus fort avant l'arrêt. Ces résultats sont confirmés par une modélisation polynomiale des profils de vitesses. Les difficultés d'anticipation du comportement des VA lors des freinages par les humains, dont fait état la littérature, pourraient résider dans ces différences dans la gestion des décélérations.

L'analyse détaillée de 33 accidents survenus lors de manœuvres d'arrêt confirme la revue de littérature et le rôle de l'inattention ou du manque d'anticipation comme facteur prépondérant.

Compte tenu des comportements humains observés lors des manœuvres d'arrêt, de leurs défaillances, et de la littérature disponible sur les premiers accidents de VA, il apparaît utile de considérer que :

- Le véhicule autonome devrait pouvoir adapter sa dynamique, en fonction du contexte d'infrastructure, de la dynamique des autres véhicules et de la perception de danger des usagers vulnérables, notamment en cas de freinage ou de manœuvre d'arrêt
- Le véhicule autonome devrait pouvoir adapter sa cinématique de freinage en amont des carrefours en fonction du régime de priorité. En présence d'un stop (arrêt certain) le VA doit freiner tardivement pour éviter de surprendre l'utilisateur qui le suit (2RM ou VL).

Les résultats présentés dans ce livrable ont été partagés et discutés au sein de la communauté SURCA. La mise en commun des différents travaux du projet, et l'échange des différents points de vues et approches, a permis d'aboutir à des recommandations opérationnelles que l'on pourra retrouver dans les conclusions de ce livrable, ainsi que dans les exposés lors de la présentation des résultats finaux. Le lecteur pourra consulter le site <https://surca.univ-gustave-eiffel.fr/> pour de plus amples informations.

## I- Table des matières

I-	Table des matières .....	6
II-	Glossaire .....	7
III-	Introduction.....	9
	Présentation du projet SURCA .....	9
	Objectifs du WP4.....	9
	Présentation des travaux menés.....	9
IV-	Déboitement, rabattement et insertions (Cut-in, cut-out & insertions).....	11
	Analyse des situations observées en situation naturelle .....	11
	Etude 1 : Déboitements, rabattements et insertions dans les données MOOVE.....	11
	Etude 2 : Déboitements, rabattements et insertions dans les données UDrive.....	25
	Analyse des situations observées lors d'accidents.....	50
	Etudes Détaillées d'Accident (EDA).....	50
V-	Manœuvres d'arrêt (décélération).....	55
	Analyse des situations observées en situation naturelle .....	55
	Objectifs de l'étude .....	55
	Matériel et méthodes.....	56
	Résultats .....	65
	Discussion et conclusion.....	77
	Analyse des situations observées lors d'accidents.....	78
VI-	Conclusions et recommandations.....	84
	Recommandations pour gérer les cut-in par anticipation .....	86
	Recommandations pour réduire les conséquences des cut-in .....	86
	Recommandations pour les changements de voies sur autoroute .....	87
	Recommandations pour l'adaptation du VA au contexte (2/2) .....	87
	Recommandations sans consensus scientifique : Mimétisme vs Spécifique .....	88
VII-	Bibliographie .....	89

## II- Glossaire

Le glossaire suivant rappelle quelques concepts clés sur la définition de l'automatisation de la conduite, et définit quelques abréviations.

### Niveau d'automatisation

Ces niveaux sont définis par une norme SAE: J3016, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems".

**Niveau 0 :** Le système automatisé émet des avertissements et peut intervenir ponctuellement (exemple, ABS ESP) pour améliorer la conduite du conducteur mais n'a pas le contrôle latéral ou longitudinal du véhicule. Le conducteur réalise toutes les tâches liées à la conduite.

**Niveau 1 :** Le conducteur et le système automatisé partagent le contrôle du véhicule, un des deux réalise le latéral, l'autre le longitudinal. Des exemples sont le régulateur de vitesse adaptatif (ACC), où le conducteur contrôle la direction et le système automatisé contrôle la vitesse. Le conducteur doit surveiller tous les éléments de la scène routière et doit décider quand il veut ou doit reprendre le contrôle total de son véhicule à tout moment.

**Niveau 2 :** Le système automatisé peut prendre le contrôle total du véhicule en accélération et direction. Le conducteur doit surveiller la conduite et être prêt à intervenir à tout moment, par exemple si le système automatisé ne répond pas correctement. Un contact entre la main et le volant est souvent obligatoire (implémenté dans certains systèmes mais pas encore réglementé) lors de la conduite de la SAE 2, pour confirmer que le conducteur est présent et prêt à intervenir.

**Niveau 3 :** Le conducteur peut détourner son attention des tâches de conduite en toute sécurité mais doit être capable de gérer des situations non ordinaires comme une injonction des forces de l'ordre ou l'arrivée de véhicules prioritaires. Le système automatisé prendra en charge les situations nécessitant une intervention immédiate, comme le freinage d'urgence. Le conducteur doit toujours être prêt à reprendre la main sur demande du véhicule soit en urgence soit en cas d'atteinte des limites de fonctionnement (exemple, sortie d'autoroute si le système n'est pas conçu pour cela), si le véhicule le lui demande. L'obligation de prévoir une « manœuvre minimale de risque » est au cœur des discussions réglementaires pour ce niveau en cas de non reprise en main par le conducteur.

**Niveau 4 :** Dans certaines conditions, le conducteur peut s'endormir ou quitter le siège du conducteur en toute sécurité, car le système automatisé prend entièrement le relais. En dehors de ces zones ou circonstances, le véhicule doit être en mesure d'interrompre le voyage en toute sécurité, c'est-à-dire de mettre le véhicule en sécurité, si le conducteur ne reprend pas le contrôle (le conducteur a toujours l'option de reprendre le contrôle).

**Niveau 5 :** Aucune intervention humaine n'est requise dans l'exécution des tâches de conduite.

### Conduite manuelle

La conduite manuelle correspond aux phases où un conducteur humain assure la totalité des tâches liées à la conduite. En niveau 0, le véhicule est entièrement en conduite manuelle sur toutes les phases de conduite, en niveau 5 plus du tout.

### Conduite automatisée

La conduite automatisée correspond aux phases où un système automatisé assure une partie ou toutes les tâches liées à la conduite. En niveau 5, le véhicule est en conduite automatisée sur toutes les phases de conduite, en niveau 0 plus du tout.

### VA (Véhicule automatisé)

Véhicule se situant au moins au niveau d'automatisation SAE 2, objet de l'étude.

Dans le cadre de SURCA, ce véhicule pourra être appartenir à l'une des catégories suivantes :

- Véhicule Léger
- Véhicule Utilitaire Léger
- Poids Lourd

et faire l'objet de l'une des catégories d'usage suivantes :

- Usage Véhicule Particulier
- Usages professionnels
- Transport Public (dont navette)

### VPA (Véhicule partiellement automatisé)

VA se situant au moins au niveau d'automatisation SAE 2, au plus haut niveau d'automatisation SAE 3, dans les limites définies pour son utilisation en autonomie.

### VTA (Véhicule totalement automatisé)

VA se situant au moins au niveau d'automatisation SAE 4 dans les limites définies pour son utilisation en autonomie, sans supervision du conducteur.

## III- Introduction

### Présentation du projet SURCA

L'objectif global de ce projet est de contribuer à une meilleure intégration des véhicules automatisés (VA) dans la circulation actuelle. Il s'agit ainsi d'identifier quelles interactions existent entre les différents usagers de la route et quelles stratégies pertinentes sont mises en place par les conducteurs. Cela permettra de faire des recommandations aux concepteurs de VA et aux gestionnaires d'infrastructures sur les besoins et les limites en termes d'interactions et en termes de comportement du VA.

### Objectifs du WP4

Les objectifs du WP4 dans le projet SURCA sont tout d'abord de décrire les principaux scénarios critiques dans le cadre de l'introduction de VA dans le trafic, et plus particulièrement ceux qui nécessitent des interactions entre les conducteurs de véhicules légers (VL) (Tâche 4.1 : Sélection des scénarios d'interaction qui seront retenus pour les analyses plus fines).

A partir des résultats précédents, il s'agit d'effectuer une analyse des interactions entre VL de manière à identifier les interactions pertinentes pour la conduite automatisée. En lien avec les autres work-packages, et plus particulièrement le WP5 (Interactions véhicule / 2RM), il s'agit d'identifier les variables descriptives dans des scénarios d'interaction avec un véhicule, notamment en phase d'interaction forte comme une insertion, un dépassement, ou une situation de décélération forte. Dans ces phases critiques, le VA diffère des usagers classiques et induit une modification de comportement de ces derniers qu'il convient d'identifier.

Enfin, le dernier objectif consiste dans la reconstruction des accidents, l'évaluation des gains attendus et l'identification des nouveaux risques éventuels liés aux VA. En parallèle, une plateforme de simulation combinant un modèle de conduite humaine et un modèle de véhicule autonome est développée et mise en œuvre sur certains scénarios critiques afin d'évaluer les risques liés à la cohabitation des VA avec des conducteurs humains.

### Présentation des travaux menés

Les travaux menés dans cette tâche ont cherché à identifier les nouveaux risques éventuels liés à l'introduction des VA dans le trafic. Pour cela, de nombreuses sources de données de conduite issues de précédents travaux ont été analysées pour comprendre les facteurs agissants sur la survenue de situations de conduites à risque. En préalable une réflexion (Livrable L4.1 : Sélection des scénarios d'interaction qui seront retenus pour les analyses plus fines) a été menée par un collectif d'expert du véhicule autonome et de l'accidentologie pour identifier les scénarios de conduites à fort enjeu du point de vue de la sécurité routière des VA. Au terme de ce travail, deux situations de conduite semblent prioritaires pour des analyses plus poussées :

- Les situations de déboitement, rabatement et insertions.
- Les manœuvres d'arrêt.

Chacune de ces situations de conduite a été recherchée, soit dans des données de conduite recueillies en situation naturelle (BDD Moove-Vedecom, BDD UDrive-CEESAR, BDD Cerema-Uni Eiffel), soit dans des études détaillées d'accidents (LAB).

Le plan de présentation des travaux suit donc ce cheminement, un chapitre pour chaque situation de conduite, et une partie pour chaque type de données analysées.

La première situation étudiée concerne les situations de déboitement, rabattement et insertions. Dans ce contexte, les études menées à partir de données de conduite en situation naturelle ont adopté deux méthodologies complémentaires. La première, sur les données MOOVE, est une approche statistique visant à décrire les situations observées dans leur ensemble, en cherchant à déterminer les caractéristiques des comportements humains et les confronter aux conditions d'opérations du véhicule autonome. Les résultats obtenus concernent plus de 10 000 manœuvres de changement de voie par des véhicules légers (VL) réalisées juste devant les véhicules équipés MOOVE. Cela correspond à des manœuvres de rabattement quand le véhicule vient de la voie de gauche, et d'insertion quand il vient de la voie de droite (les situations atypiques comme les dépassements par la droite ont été exclues de l'analyse).

La seconde approche exploite la qualité des données UDrive pour rechercher, parmi les deux situations de conduite identifiées, celles qui relèvent de situations risquées et qui de ce fait pourraient déclencher une alerte de sécurité pour un véhicule autonome. La faible quantité d'évènements identifiés autorise une analyse détaillée de l'évolution d'une telle situation. Ces analyses mettent en évidence la capacité des conducteurs humains à réagir et collaborer en adaptant leurs comportements à des manœuvres dangereuses des autres véhicules.

L'étude détaillée de trois accidents survenus en situation d'insertion et/ou de rabattement font état du rôle joué par le non-respect des distances et temps inter-véhiculaire de sécurité.

Enfin, le livrable présente les résultats des études menées pour étudier les manœuvres d'arrêt, d'un point de vue statistique d'abord, puis dans le détail via l'étude de quelques accidents.

Du point de vue statistique, une étude a extrait plus de 2500 situations de décélérations avant un arrêt du véhicule à partir des BDD de conduite en situation naturelle. Les difficultés d'anticipation du comportement des VA lors des freinages par les humains, dont fait état la littérature, pourraient résider dans ces différences dans la gestion des décélérations.

L'analyse détaillée de 33 accidents survenus lors de manœuvres d'arrêt confirme la revue de littérature et le rôle de l'inattention ou du manque d'anticipation comme facteur prépondérant.

Les résultats présentés dans ce livrable ont été partagés et discutés au sein de la communauté SURCA. La mise en commun des différents travaux du projet, et l'échange des différents points de vues et approches, a permis d'aboutir à des recommandations opérationnelles que l'on pourra retrouver dans les conclusions de ce livrable, ainsi que dans les présentations lors de la présentation des résultats finaux.

## IV- Déboitement, rabatement et insertions (Cut-in, cut-out & insertions)

### Analyse des situations observées en situation naturelle

Deux études sont présentées qui concernent des données acquises en conditions naturelles. La première est une étude statistique, la seconde une étude de cas détaillés.

- Etude 1 : Déboitement, rabatement et insertions dans les données MOOVE
- Etude 2 : Déboitement, rabatement et insertions dans les données UDrive

### Etude 1 : Déboitements, rabattements et insertions dans les données MOOVE

#### Description des données étudiées

Les données étudiées dans ce chapitre sont extraites de la base de donnée MOOVE.

Les données MOOVE sont enregistrées à bord de véhicules équipés de capteurs extéroceptifs (voir Figure 1) capable de détecter et localiser les véhicules en les obstacles environnants :

- une caméra Mobileye Q2 (à l'avant),
- un radar longue portée (à l'avant),
- 4 radars courte portée (sur les 4 ailes),
- 2 lidars Scala (à l'avant et à l'arrière).

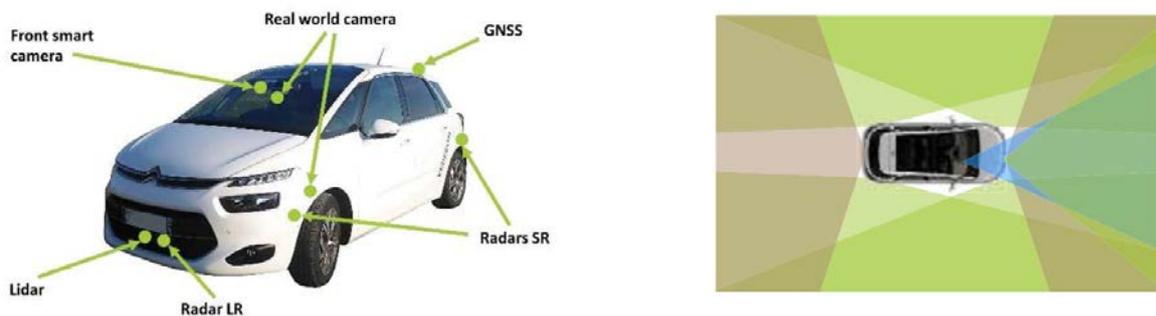


Figure 1 : Positions et angles de vue des capteurs extéroceptifs des véhicules MOOVE

Ces véhicules sont conduits par des chauffeurs professionnels en condition de conduite réelle.

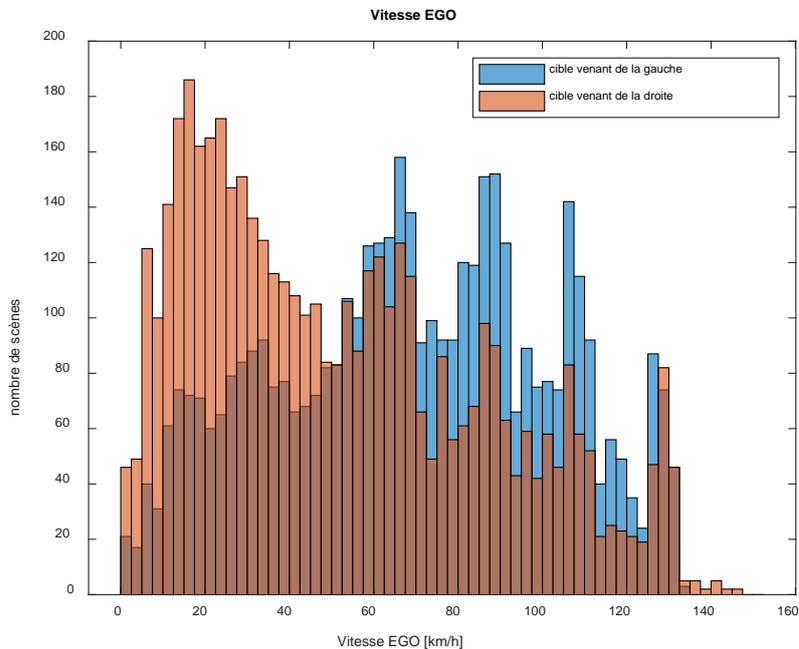
Pour les manœuvres de changement de voies, deux extractions ont été réalisées dans la base de données MOOVE.

Une première extraction contient **13638 scènes**, dans lesquelles un **véhicule qui roulait sur une voie adjacente change de voie et se place devant l'Ego**. Parmi ces scènes, 3556 ont été exclues car le véhicule cible n'était pas présent sur toute la durée de la scène ou n'était pas correctement classifiée.

**Parmi les scènes restantes, nous obtenons :**

- **10082 scènes** pour lesquelles la manœuvre de changement de voie est effectuée par un véhicule léger (VL), parmi lesquelles **5188 scènes** où véhicule cible arrive de la voie de gauche (**manœuvre de rabatement**), et **4894 scènes** où véhicule arrive de la voie de droite (**manœuvre d'insertion**). Ces scènes couvrent différentes conditions de trafic avec des vitesses de circulation qui couvrent toute la gamme de vitesse de 0 km/h (circulation à l'arrêt) à 130km/h (voir Figure 2).

- **1640 scènes** pour lesquelles la manœuvre de changement de voie est effectuée par un véhicule « **deux-roues motorisé** » (2RM). L'exploitation de ces données sera décrite dans le livrable L5.2 du projet SURCA (Livrable non disponible à l'heure de l'écriture de ces lignes, le lecteur pourra se reporter au site <https://surca.univ-gustave-eiffel.fr/> pour les derniers documents disponibles).



**Figure 2 : Nombre des manœuvres d'insertion (cible venant de la droite) et de rabattement (cible venant de la gauche) dans la première extraction, en fonction de la vitesse du véhicule Ego.**

Une seconde extraction concerne uniquement les scènes où le véhicule s'insère depuis une voie d'insertion (Figure 3). Sur les 176 scènes extraites, 29 ont été exclues car le véhicule qui s'insère n'est pas reconnu par les capteurs comme un véhicule léger ou un deux-roues motorisé (2RM).

Nous avons donc étudié 157 scènes, parmi lesquelles 143 scènes où le véhicule qui s'insère est un véhicule léger, et 15 scènes où le véhicule qui s'insère est un 2RM. La Figure 3 montre que pour la majorité des scènes extraites, le véhicule Ego roule à une vitesse inférieure à 30 km/h.

Ces données qui concernent les voies d'insertion seront exploitées séparément à la fin de cette partie dans le chapitre 4 (cas des voies d'insertion).

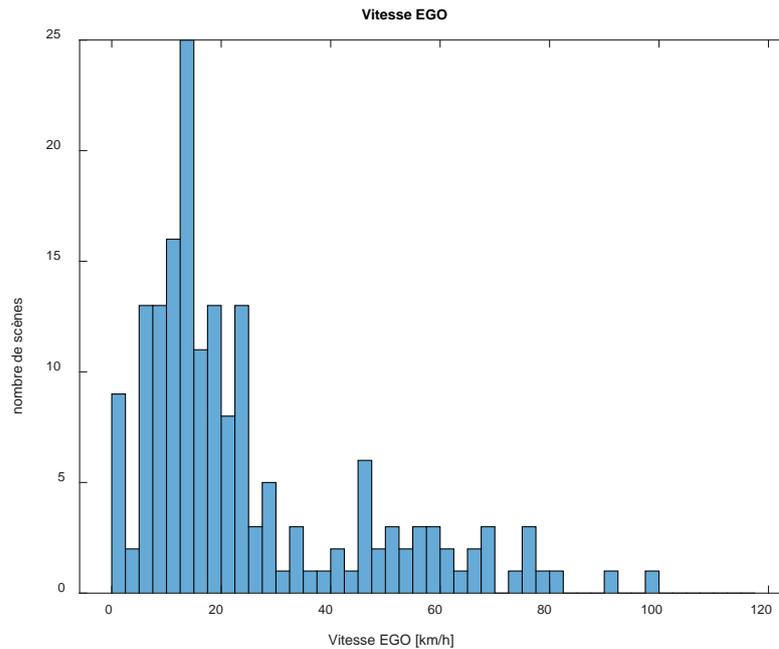


Figure 3 : Répartition du nombre de scènes sur voie d'insertion (2<sup>nd</sup>e extraction) en fonction de la vitesse de l'Ego.

Pour chaque scène de la base de données, nous disposons des données suivantes :

- **Données disponibles pour le véhicule Ego:**
  - Position GPS, position dans la voie (distance par rapport au marquage) et numéro de la voie actuellement empruntée.
  - Vitesse (longitudinale et latérale), accélération (longitudinale et latérale), vitesse de lacet.
  - Actions réalisées par le conducteur (angle et vitesse de rotation du volant, appui sur les pédales, action sur les clignotants).
- **Données disponibles pour les obstacles mobiles (maximum 12 obstacles par scène)**
  - Position relative à l'Ego, orientation, taille (longueur, largeur).
  - Vitesse absolue et relative (longitudinale et latérale), accélération (longitudinale).
  - Temps jusqu'à collision (Time To Collision, TTC) et temps inter-véhiculaire (TIV) par rapport à l'Ego.
  - Utilisation du clignotants et feux de frein (obtenus via la caméra Mobileye).
- **Données disponibles sur l'infrastructure:**
  - Nombre de voies et largeur des voies.
  - Type de marquage, couleur du marquage.
  - Limitations de vitesse, présence de panneaux.
  - Présence de voie d'insertion / travaux / intersection.
  - Courbure / pente de la route.
- **Données disponibles sur l'environnement**
  - Température, présence de brouillard et de pluie.
  - Conditions lumineuses (jour/nuit).
- **Pour chaque scène, les données ont été extraites à 4 instants T1, T2, T3 et T4 définis ainsi (Figure 4) :**

- T2 : instant de début du franchissement de la voie par la cible (le bord du véhicule empiète sur le marquage).
- T3 : fin du franchissement (le véhicule a entièrement franchi le marquage).
- Les instants T1 et T4 correspondent respectivement à 3 secondes avant T2, et 3 secondes après T3.

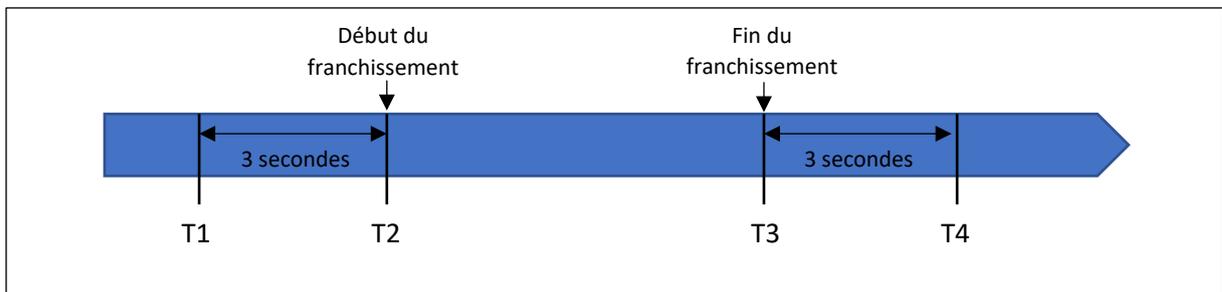


Figure 4 : Définition des instants T1, T2, T3 et T4.

Pour illustration, nous avons représenté les données disponibles aux 4 instants extraits de la base de données pour deux scènes : une scène d'insertion et une scène de rabattement (voir Figure 5).

Les véhicules sont représentés par des rectangles. Les dimensions et l'orientation des rectangles correspondent aux valeurs indiquées dans la base de données pour chaque obstacle mobile.

Les numéros indiqués dans les véhicules correspondent à leur identifiant unique dans la base de données. L'avant des véhicules est indiqué par une flèche dans le rectangle.

Le véhicule EGO est affiché en noir au centre (la position du véhicule Ego définit le centre du repère).

Le véhicule qui effectue le changement de voie est affiché en bleu s'il s'agit d'un VL et en rouge s'il s'agit d'un 2RM. Ce véhicule sera dénommé « véhicule cible » dans la suite de ce chapitre.

Les autres VL sont en cyan et les autres 2RM sont affichés en magenta. Si des obstacles mobiles ne sont pas classifiés (VL ou 2RM), ils sont affichés en vert.

La vitesse de l'Ego et la vitesse relative de la cible à chaque instant sont affichées à gauche de la figure.



### Traitement et enrichissement des données

Pour l'analyse des scènes, il nous a fallu compléter les données extraites par le calcul du temps inter véhiculaire (TIV) et du temps avant collision (time to collision, TTC). Ces grandeurs sont calculées à partir de l'inter distance DX et des vitesses de l'Ego ( $V_{Ego}$ ) et de la cible ( $V_{Cible}$ )

$$TIV = \frac{DX}{V_{Ego}}$$

$$TTC = \frac{DX}{V_{Cible} - V_{Ego}}$$

### Caractérisation des manœuvres de changement de voie (insertion et rabattement)

#### a- Vitesse relative de la cible

En comparant les vitesses relatives des cibles arrivant de la droite et de la gauche avant le début de la manœuvre (instant T1), nous remarquons une différence liée au type de manœuvre (voir Figure 6).

En effet, la circulation est généralement plus rapide sur la voie de gauche, qui sert au dépassement, que sur la voie de droite.

Ainsi, lorsque la cible se rabat (il vient de la voie de gauche), sa vitesse est généralement supérieure à celle de l'égo. De même, la vitesse des véhicules venant de la droite (manœuvre d'insertion) est généralement inférieure à celle de l'égo et nécessite une adaptation de la vitesse de ce dernier.

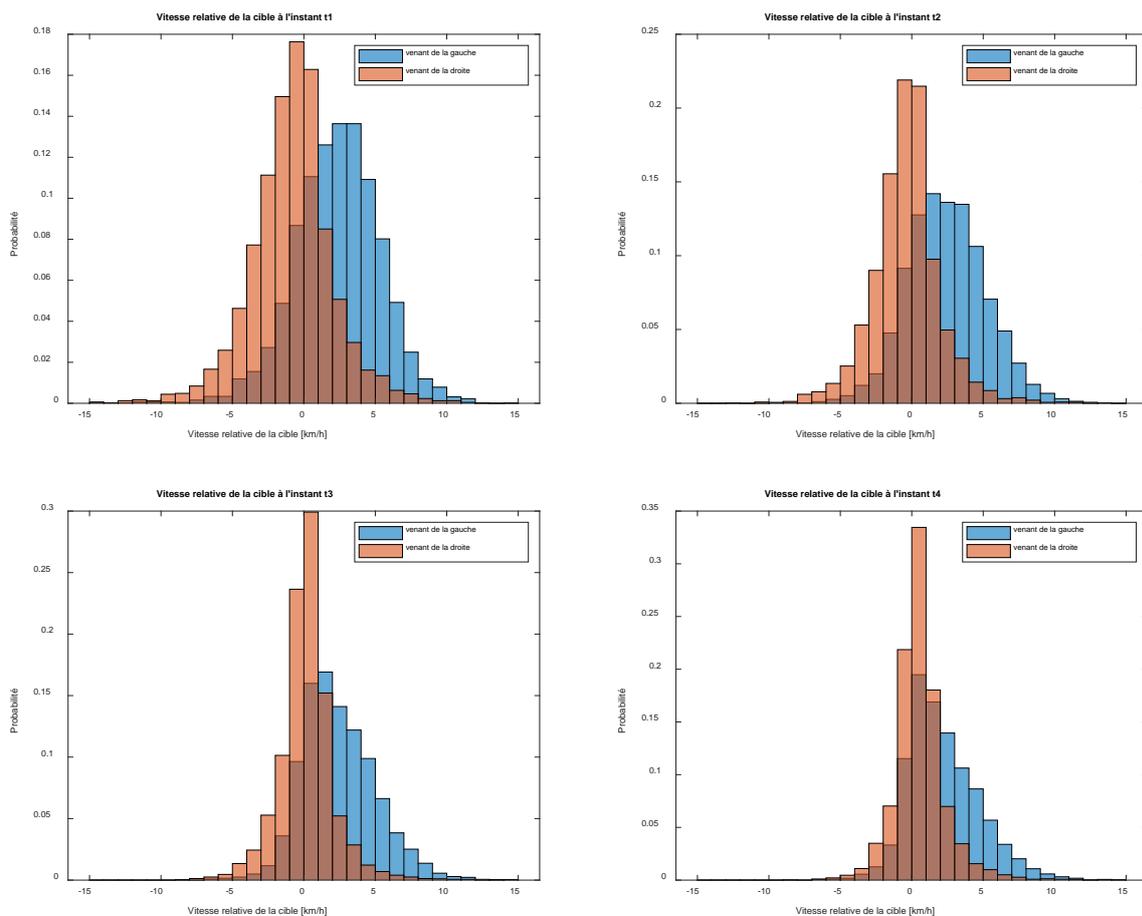
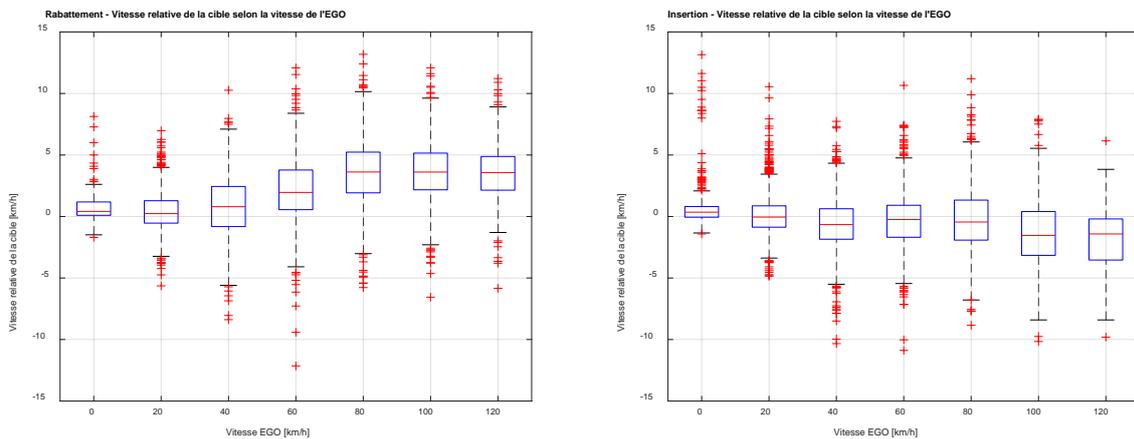


Figure 6 : Evolution de la vitesse relative de la cible au cours de la manœuvre

Après la manœuvre (instant T4), la différence de vitesse entre l'égo et le véhicule cible s'est beaucoup réduite ce qui montre que les véhicules ont adapté leur vitesse au cours de la manœuvre.

En particulier, pour les manœuvres d'insertion (quand la cible vient de la droite), les vitesses relatives à T4 sont proches de zéro. L'égo a donc réduit sa vitesse ou la cible a accéléré.

Nous regardons à présent l'influence de la vitesse de l'égo véhicule. Nous avons classé les scènes en fonction de la vitesse du véhicule Ego (7 classes) et affiché (Figure 7) la répartition des vitesses relatives de la cible pour chacune de ces classes sous la forme de diagrammes en boîtes (box plot).



**Figure 7 : Répartition de la vitesse relative de la cible pour différentes classes de vitesse du véhicule Ego pour des manœuvres de Rabattement (à gauche) et d'insertion (à droite)**

Elles sont logiquement positives pour des manœuvres de rabattement et négatives pour des manœuvres d'insertion.

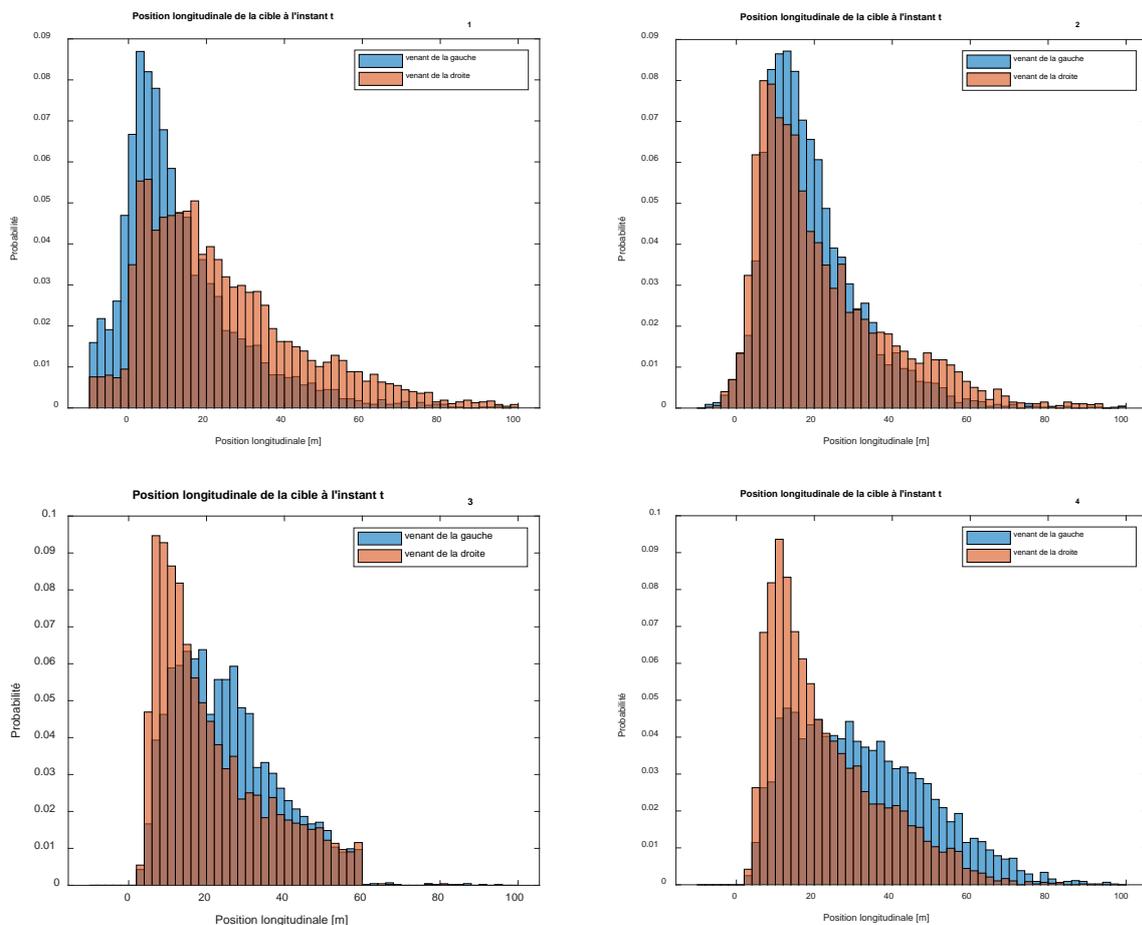
En circulation ralentie (<30km/h), les vitesses relatives des cibles sont faibles et s'accroissent lorsque la vitesse de circulation augmente.

## b- Inter-distance et temps inter-véhiculaire

Nous nous intéressons dans cette partie à la distance du véhicule cible au début et à la fin du changement de voie (instant T2 et T3).

En affichant les histogrammes de la position relative des véhicules cibles à T2 et T3 (Figure 8), nous notons encore une fois une différence notable entre le comportement des véhicules venant de la droite et de la gauche, du fait de la plus faible vitesse relative des véhicules venant de la droite.

Les inter-distances sont en effet semblables au début de la manœuvre (T2), mais à la fin de la manœuvre, la distance des véhicules venant de la droite s'est réduite (leur vitesse est généralement inférieure à celle du véhicule Ego). Pour ces véhicules, elle est inférieure à 20m dans la majorité des scènes étudiées.



**Figure 8 : Evolution de la position relative de la cible a cours de la manœuvre.**

Dans certains cas, la distance de la cible est négative à l'instant T2. Les véhicules concernés ont donc initié le changement de voie (début du franchissement de la ligne) avant d'avoir dépassé complètement le véhicule Ego.

Il est plus simple de se représenter la distance d'un véhicule et la traduisant sous la forme de temps inter-véhiculaire (TIV). Le TIV est défini par le temps nécessaire à l'égo véhicule pour atteindre la position actuelle de la cible située devant lui.

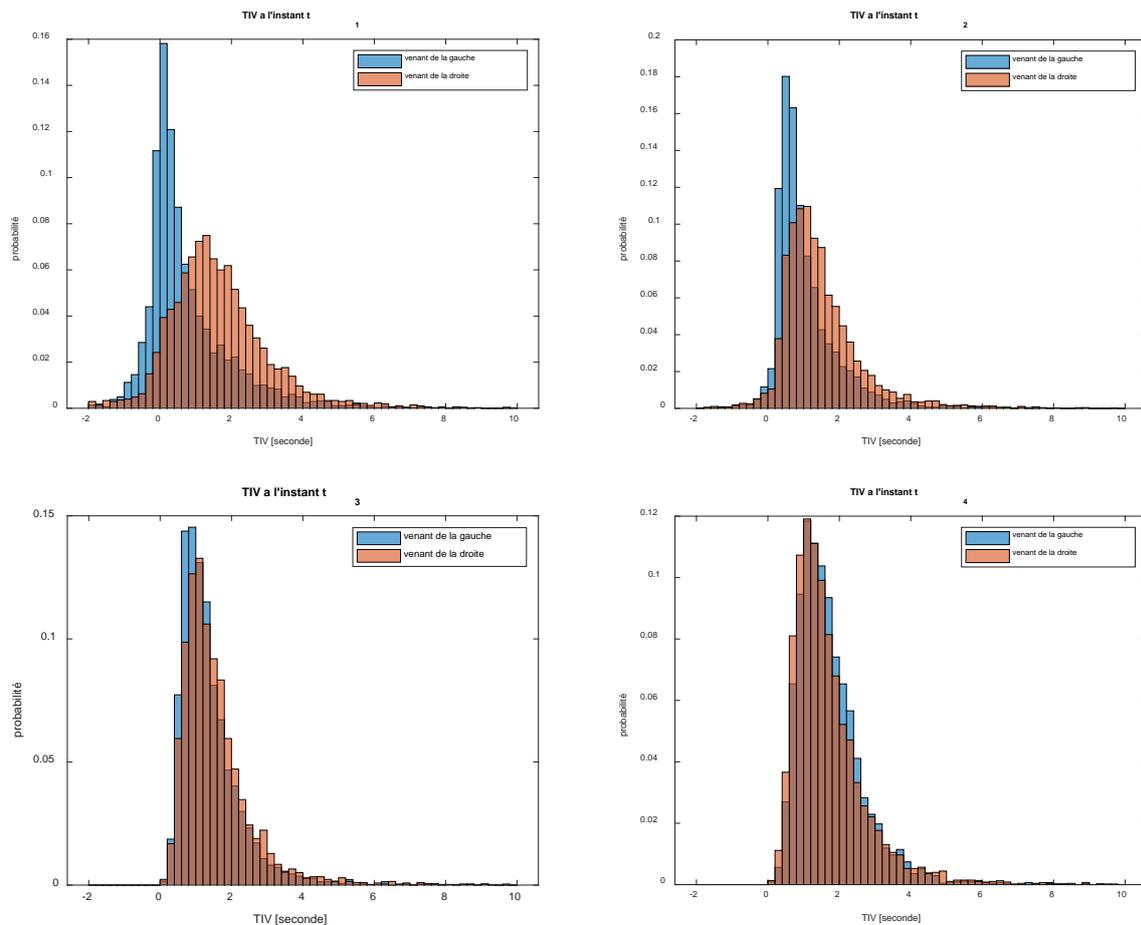


Figure 9 : Histogrammes du TIV de la cible aux instant T1, T2, T3 et T4

L'histogrammes du TIV du véhicule cible (Figure 9) à l'instant T2 montre qu'au moment d'initier une manœuvre de rabattement, le TIV est inférieur à 1 seconde dans la majorité des cas.

Les TIV aux instant T3 sont semblables pour les manœuvres d'insertion et de rabattement. Ils sont inférieurs à 0.6 secondes dans quasiment 10% des scènes étudiées. Ces TIV sont très inférieurs à la distance de sécurité préconisés (qui correspond à un TIV de 2 secondes), et même inférieure au temps de réaction moyen d'un conducteur humain (généralement estimé à 1 seconde). En situation de conduite, nous observons donc régulièrement des situations qui pourraient être considérées comme dangereuses par un véhicule automatisé.

Nous notons qu'entre T3 et T4, les TIV des véhicules ont peu évolué. La modification de vitesse liée à la manœuvre d'insertion ou de rabattement a donc principalement lieu pendant la phase de changement de voie.

### c- Décélération du véhicule Ego

Nous avons mis en évidence précédemment que lorsque la cible s'insère juste devant le véhicule égo, celui-ci doit adapter sa vitesse.

En particulier, lorsque la vitesse relative de la cible est négative, cela contraint le véhicule égo à réduire sa vitesse. Nous essayons à présent de quantifier cette décélération. Les différentes scènes ont été

classés selon le TIV et la vitesse relative entre la cible et l'Ego à l'instant T3. Pour chaque classe, nous avons calculé la décélération moyenne de l'Ego entre T2 et T3 (voir Figure 10).

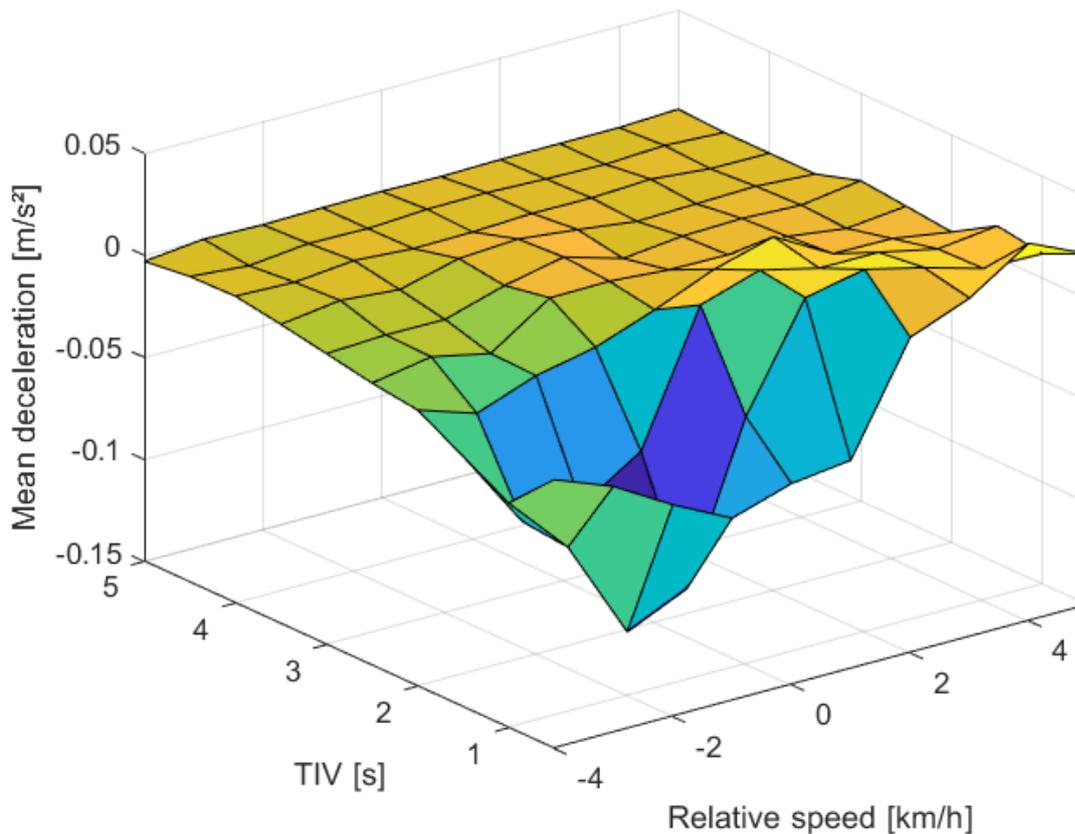


Figure 10 : Décélération moyenne de l'égo pour différentes classes de TIV et de vitesse relative

Lorsque la vitesse relative est positive ou nulle, le véhicule égo ne ralentit pas, même pour des temps inter véhiculaire (TIV) très faible (0,5 seconde).

De même, lorsque le TIV est supérieur ou égal à 2 secondes, on n'observe quasiment pas de changement de la vitesse du véhicule égo.

Lorsque l'on observe à la fois un TIV inférieur ou égal à 1,5 seconde, et une vitesse relative négative, le véhicule égo réduit sa vitesse, avec une décélération moyenne de l'ordre de 0,1 m/s<sup>2</sup>.

#### *Cas des voies d'insertions*

Dans cette partie, nous étudions les 157 scènes pendant lesquelles un véhicule cible roulant sur une voie d'insertion s'est inséré devant le véhicule Moove.

Sur la Figure 11, nous pouvons noter que pour la plupart de ces scènes, la vitesse du véhicule Moove était réduite (<30 km/h), ce qui semble indiquer que la circulation était ralentie.

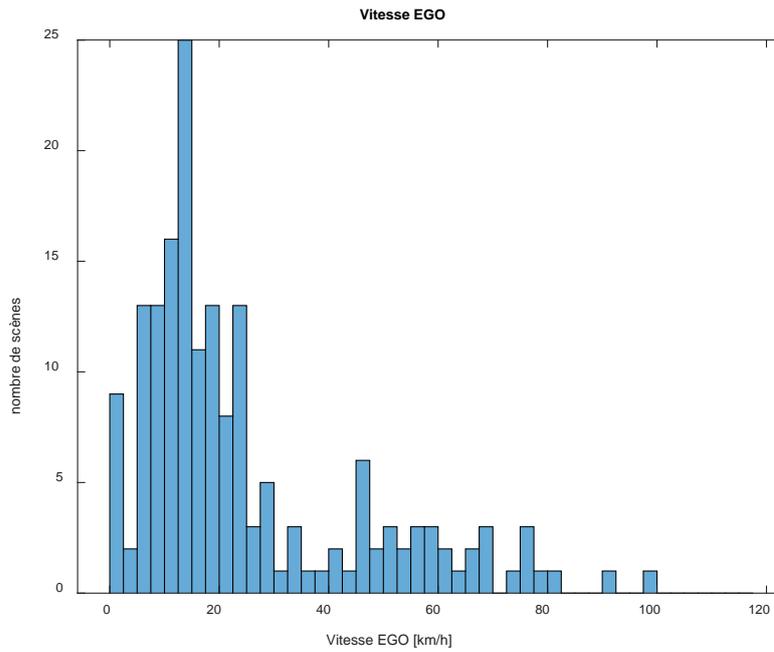
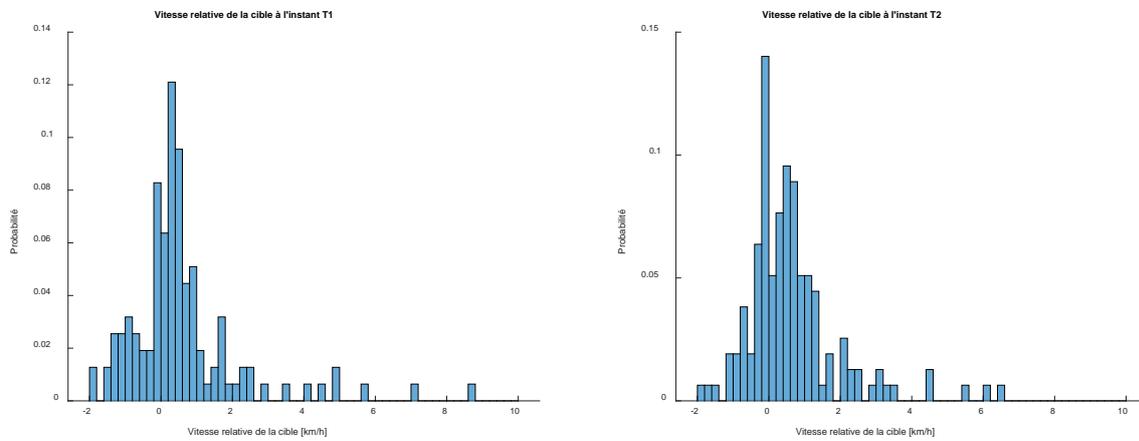


Figure 11 : Vitesse du véhicule Ego lors des manœuvres d’insertion.

En s’intéressant à présent au véhicule qui s’insère (la cible), nous notons que les vitesses relatives et les temps inter véhiculaires (TIV) ont un profil proche de ce que nous observons pour des manœuvres d’insertion hors d’une voie d’insertion (figures 12 et 13). Les vitesses relatives sont plutôt faibles, ce qui s’explique par le fait que la vitesse de circulation était réduite pour la majorité des scènes extraites.



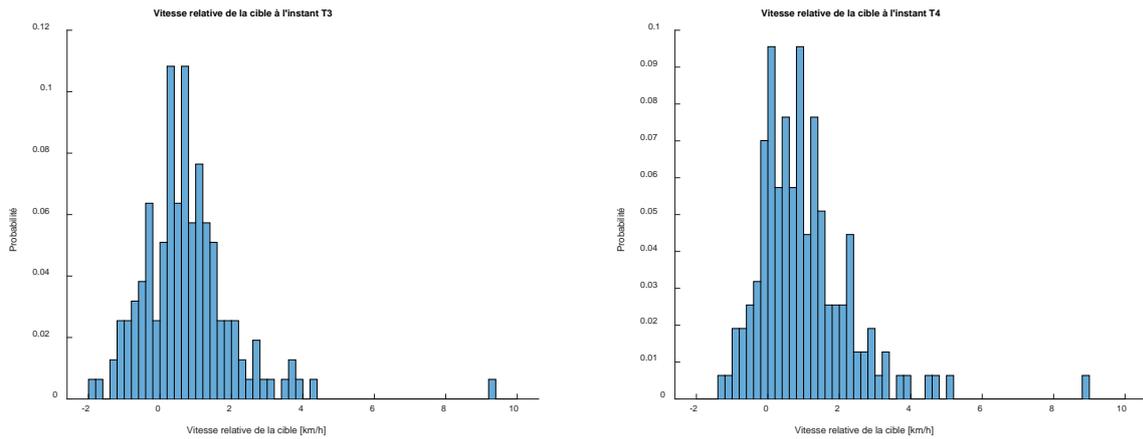


Figure 12 : Evolution de la position relative de la cible a cours de la manœuvre.

Nous notons également que le TIV entre la cible et le véhicule Ego sont inférieurs à 2 secondes pour la majorité des scènes extraites (Figure 12).

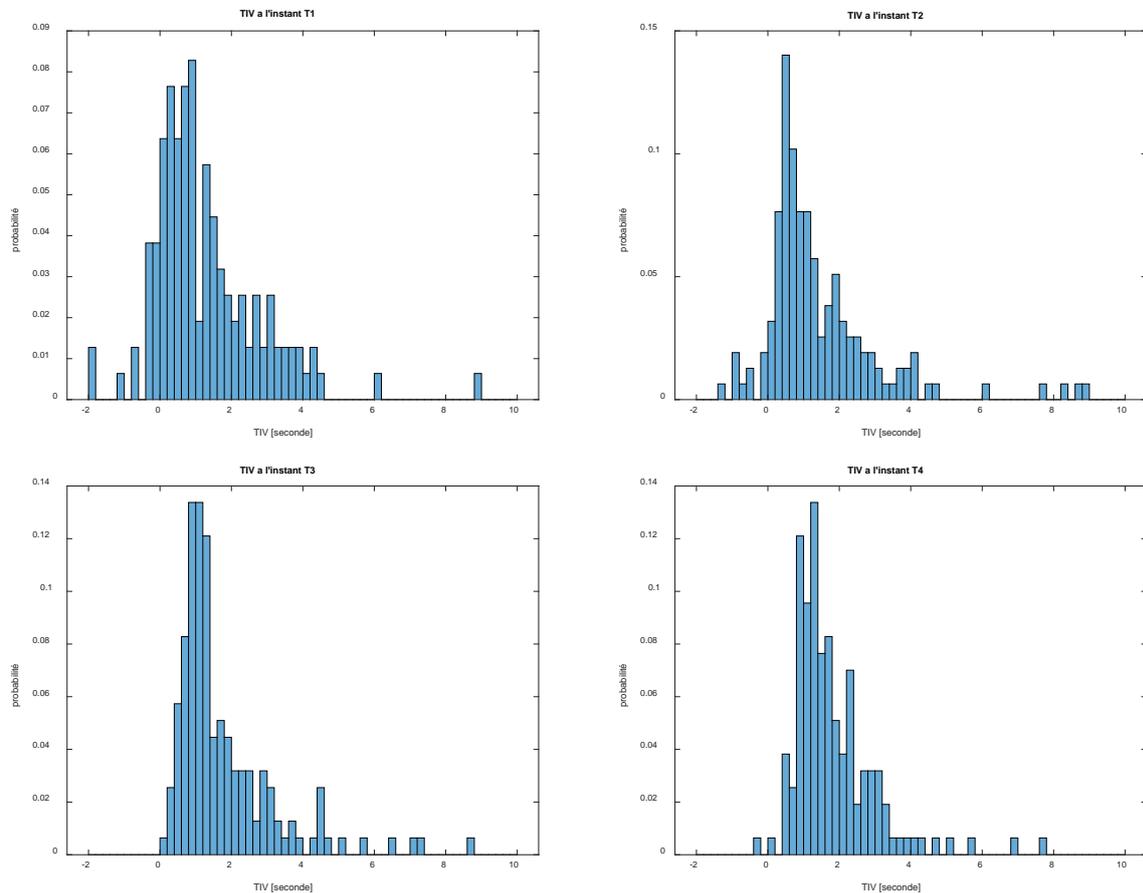


Figure 13 - Evolution du TIV de la cible a cours de la manœuvre

Nous intéressons à présent à la position du véhicule précédent le véhicule Ego avant la manœuvre d’insertion. Le véhicule cible vient donc s’insérer entre ces deux véhicules.

A l’instant T1(Figure 14), une majorité de véhicules se trouvent à moins de 10m à l’avant de véhicule Ego, ce qui empêche un véhicule de venir s’insérer entre les deux. Quand on regarde à l’instant T2, le

nombre de véhicules se trouvant à moins de 10 a diminué, et à l'instant T3, les véhicules se trouvent à plus de 10m pour la quasi-totalité des scènes, ce qui permet à la cible de venir s'insérer.

Cela met en évidence que le véhicule Ego a adapté sa distance avec le véhicule précédent pour permettre à la cible de s'insérer. La cible n'aurait probablement pas pu s'insérer sans cela.

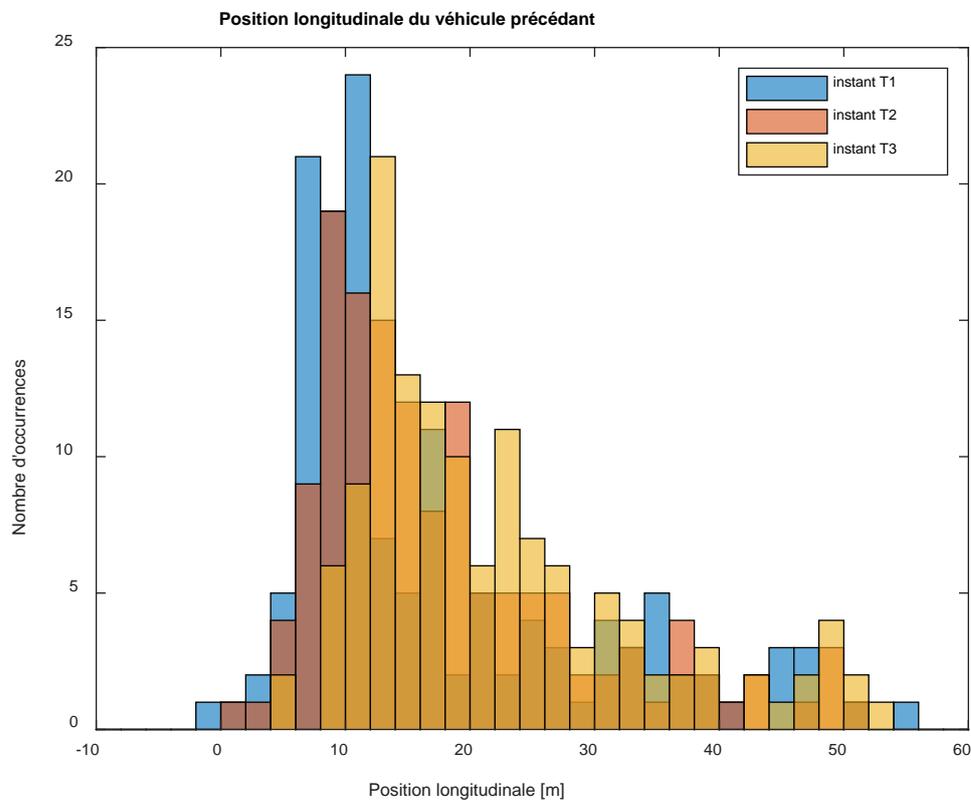


Figure 14 : Evolution de l'inter distance entre l'Ego et le véhicule qui le précède

### Conclusion

Dans cette partie, nous avons exploité les données de plus de 10 000 manœuvres de changement de voie par des véhicules légers (VL) réalisées juste devant les véhicules équipés MOOVE. Cela correspond à des manœuvres de rabattement quand le véhicule vient de voie de gauche, et d'insertion quand il vient de la voie de droite.

Pour ces données, nous avons étudié la vitesse relative du dépassement selon la vitesse de circulation du véhicule MOOVE, ainsi que la distance longitudinale et le temps inter véhiculaire entre le VL et le véhicule MOOVE pendant la manœuvre.

Nous avons ainsi mis en évidence que les temps inter véhiculaire au moment du changement de voie (insertion et rabattement confondus) sont majoritairement inférieurs à 2 secondes. Ils sont même inférieurs à 0.6 seconde dans 10% des scènes étudiées.

Lors des manœuvres de rabattement, les véhicules qui se rabattent ont une vitesse généralement supérieure au véhicule MOOVE, et ils semblent garder cette vitesse après la manœuvre.

Lors des insertions, la vitesse relative des véhicules qui effectuent le changement de voie est généralement négative. Cependant, les véhicules impliqués (celui qui change de voie ou le véhicule

Ego) semblent adapter leur vitesse au cours de la manœuvre si bien que leurs vitesses relatives après le changement de voie se sont réduites.

Lorsque le véhicule qui s'insère roule à la même vitesse que le véhicule Ego (ou plus vite), l'adaptation de la vitesse du véhicule Ego est très limitée, même pour des temps inter véhiculaire très faibles. La décélération est perceptible uniquement pour des vitesses relatives négatives, avec un TIV inférieur ou égal à 1,5 secondes.

Dans le cas particulier des insertions sur voie d'insertion, nous avons pu mettre en évidence que les conducteurs présents sur la voie côtoyant la voie d'insertion adaptent la distance avec le véhicule qui les précède pour permettre aux véhicules présents sur la voie d'insertion de s'insérer.

Ainsi, cette étude incite à recommander des comportements préventifs au futur véhicule autonome :

- Limiter la décélération maximale du véhicule autonome quand il subit un cut-in serré pour éviter de surprendre le véhicule suiveur.
- Si un véhicule roulant sur une voie d'insertion semble vouloir s'insérer devant un véhicule autonome, celui-ci doit adapter son inter-distance avec le véhicule qui le précède pour faciliter l'insertion.

## Etude 2 : Déboitements, rabattements et insertions dans les données UDrive

### Objet de l'étude

Les données utilisées dans cette étude sont extraites de la base de données naturaliste UDRIVE. Si elles n'offrent pas le même niveau de précision des mesures des obstacles mobiles que MOOVE, elles sont issues de trajets quotidiens de participants lambdas (et non de rouleurs professionnels). Elles présentent des comportements à la fois naturels et d'une plus grande diversité. Cette étude permet alors de généraliser l'étude précédente, qui est plus systématique sur les données, dans des contextes plus divers et plus écologiques.

L'étude s'est focalisée sur le comportement de rabattement d'un véhicule s'insérant ( $V_{ins}$ ) entre un véhicule suiveur ( $V_{suiv}$ ) et un véhicule meneur ( $V_{men}$ ), cf. Figure 15. L'objectif était d'identifier les impacts face à un rabattement agressif que peut subir un véhicule suiveur, qui sera aussi demain le VA, et les précautions à prendre pour les limiter. L'étude a été menée du point de vue du véhicule suiveur, c'est-à-dire à partir des données recueillies par l'égo-véhicule, le véhicule équipé ( $V_{suiv}$ ) sur les insertions d'un  $V_{ins}$  s'insérant entre lui et un autre véhicule devant ( $V_{men}$ ). Les insertions (rabattement depuis voie d'insertion) n'ont pas été détaillées, car difficile à discriminer en raison des limitations des données de la base.

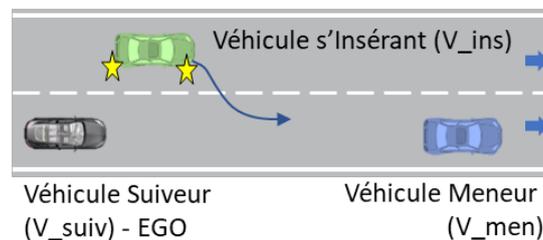


Figure 15 : Définition des véhicules intervenant dans la manœuvre.

Dans la continuité de l'étude précédente, les temps du rabattement sont (Figure 16) :

- T1 début de la manœuvre :  $V_{ins}$  modifie sa trajectoire pour se rapprocher de la ligne
- T2 début du franchissement :  $V_{ins}$  commence à mordre la ligne
- T3 fin du franchissement :  $V_{ins}$  n'est plus sur la ligne
- T4 fin de la manœuvre :  $V_{ins}$  stabilise sa trajectoire dans la voie d'arrivée

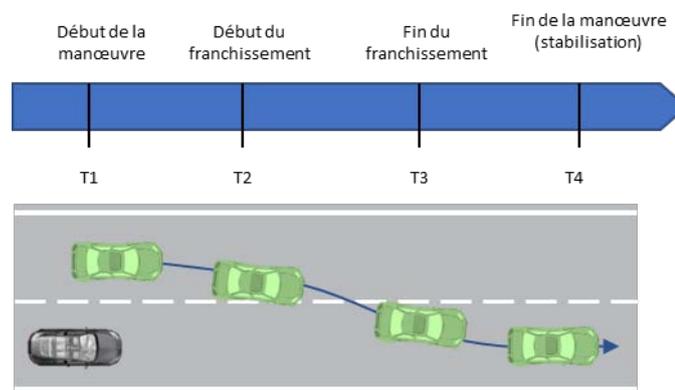


Figure 16 : Définition des temps du rabattement

Ces temps, théoriques, feront l'objet d'estimation lors de l'étude, selon les données disponibles.

### *Pré-étude à partir de scénarios critiques (identifiés précédemment au projet)*

Afin de préciser les phénomènes sécuritaires en jeu lors des rabattements agressifs, une première analyse a été menée à partir des incidents critiques précédemment identifiés dans la base de données UDRIVE<sup>1</sup>. Ces incidents critiques (ou SCE, Safety Critical Event) sont des séquences de conduites automatiquement sélectionnées à l'aide de critères (par exemple : décélération brutale) puis validées par un codage humain comme une situation d'impact qui est n'évitée que par une manœuvre d'urgence.

Les SCE ont été passés en revue pour sélectionner ceux pertinents :

- SCE sur l'ensemble de la base U-Drive : 70
- SCE sur la base France : 25
- SCE sur la base France concernant un rabattement : 14

Les SCE de Rabattement ont été sélectionnés en vérifiant les conditions suivantes :

- Présence d'un rabattement de V\_ins entre V\_suiv et V\_men
- Une infrastructure avec une voie à chaussées séparées
- L'absence d'intersections
- Pas de virages
- Une vitesse supérieure à 30 Km/h
- Suivi de la même cible durant  $t > 2s$

Ces séquences fournissent une représentativité des aspects sécuritaires des rabattements, dans la limite de l'exhaustivité des données UDRIVE et des SCE identifiés. Leur nombre limité permet l'analyse, fine, de cas particulièrement significatifs. L'analyse des 14 SCE a permis de dégager deux configurations très différentes amenant des presque accidents, selon que l'impact de l'insertion concerne le temps de réaction (rabattement « forcé » avec TIV très court) ou la capacité d'anticipation du conducteur du véhicule suiveur (insertion d'un véhicule qui « masque » un ralentissement devant).

Ces deux configurations sont présentées ci-dessous avec, à chaque fois, la présentation détaillée d'un des SCE et la présentation synoptique de l'ensemble des SCE de cette catégorie. Les SCE ont fait l'objet d'une analyse des vidéos, ce qui permet de reconstituer finement la dynamique des véhicules mais aussi de suivre le comportement et l'expressivité du conducteur (la définition des mesures de TIV et TTC sont détaillées dans l'analyse sur l'ensemble de la base, ci-après).

#### Configuration « rabattement forcé » : impact sur le temps de réaction

La première configuration identifiée est le cas le plus immédiat où le véhicule s'insérant « force » le rabattement avec un TIV très faible devant le véhicule suiveur. Elle concerne 9 SCE sur les 14.

Un exemple est détaillé ci-dessous. Ce SCE (numéro 7 du Tableau 2), se déroule sur 8 secondes, pendant lesquelles un véhicule (V\_ins), situé dans la voie congestionnée de gauche, se déporte pour se rabattre devant V\_suiv qui doit freiner d'urgence pour éviter la collision. Le déroulé fin de cette séquence est décrit dans le Tableau 1. Les temps T1 à T4 du rabattement sont alors enrichis d'étapes intermédiaires précisant les réactions du conducteur de V\_suiv et le déroulé de la situation :

---

<sup>1</sup> Evaluation of safety critical event triggers in the UDrive data, Safety Science, 132(103): 104937. Guyonvarch, L. et al. (2020).

Etape	Temps	Description
T0	Situation initiale	L’égo-véhicule (V_suiv) roule à 80 km/h sur la voie adjacente à une voie congestionnée, au trafic plus lent
T1	2189,9 sec	V_ins initie un changement de trajectoire pour se rabattre devant V_suiv
T1b	2190,4 sec	V_suiv perçoit la manœuvre de V_ins, ce qui est marqué par le mouvement du pied vers le frein et par la prise du volant avec les 2 mains
T2	2191,3 sec	V_ins commence à franchir la ligne
T2b	2192 sec	V_ins est maintenant devant V_suiv avec le TTC le plus critique de la séquence (TTC = 1,10s et une décélération max de 3,1 m/s <sup>2</sup> )
T3	2194,3 sec	V_ins fini de franchir la ligne. TTC= 2,8 s (grâce au freinage de V_suiv et à l’accélération de V_ins)
T4	2197 sec	V_ins fini de se stabiliser dans la nouvelle voie (avant de se déboîter à nouveau à gauche), la situation a perdue toute criticité

Tableau 1 : Description du SCE 7 « Rabattement forcé »

La Figure 17 propose une visualisation graphique de la séquence.

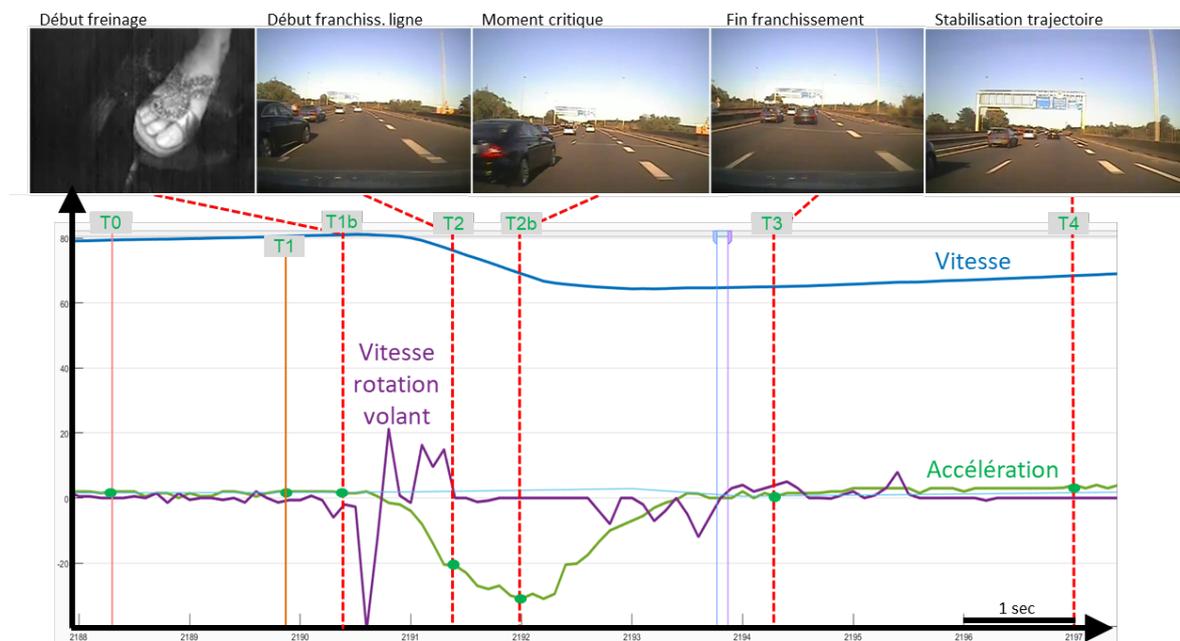


Figure 17 : Détail du SCE N°7 représentatif de la configuration « Rabattement forcé »

Parmi les 14 SCE de rabattement, 9 partagent cette caractéristique d’un rabattement très court. Ils sont synthétisés dans le Tableau 2, ci-dessous, où sont indiqués : si V\_ins a freiné avant T2, le TIV min, la variation de vitesse (en % de la vitesse entre T3 – 4sec et T3 +3 sec), une description des événements et les facteurs identifiés qui ont participé à la criticité de la situation.

N°	Scène de conduite	TIV avec V_lead	TIV avec V_Ins	TTC critique	Freine avant T2	$\Delta v$ (%km/h)	Description
1		1.6	0.348		TRUE	1.3	Ego est sur la voie de droite. V_ins est sur la voie à gauche, plus rapide et s'insère juste devant. Ego freine (avant T2) et klaxonne.
2		0.972	0.272		TRUE	-11.9	Ego est sur la voie de gauche. V_ins est sur la voie à droite, plus lente derrière un véhicule et s'insère juste devant. Ego freine (avant T2) et klaxonne.
3		0.8	0.236		TRUE	-2.9	Ego est sur la voie de gauche. V_ins vient de s'insérer sur la voie à droite, plus lente, et dès qu'il peut s'insère devant ego. Ego freine (avant T2)
4		Non détecté	4		TRUE	-21.4	V_ins est sur la voie à droite, séparé par une ligne blanche. Dès qu'autorisé par les pointillés, il s'insère devant ego, avec sa remorque, très près. Ego freine (avant T2) et klaxonne
5		2	0.219		TRUE	-10.4	Ego est sur la voie du milieu. V_ins à droite, plus lent, se décale lentement avec son cligno pour faire la place à un véhicule s'insérant devant lui. Ego freine (avant T2)
6		1.9	0.643		TRUE	8.6	Ego est sur la voie de gauche. V_ins est sur la voie à droite, plus lent derrière un camion et s'insère juste devant. Ego freine (avant T2) et klaxonne.
7		3.1	0.442		TRUE	-18.2	Ego est sur la voie de droite. La voie à gauche, plus lente, mène à une sortie. V_ins s'insère juste devant, accélère et se réinsère après avoir doublé quelques voitures. Ego freine (avant T2) et klaxonne?
8		2	0.924		TRUE	-11.9	Ego est sur la voie de gauche. V_ins s'insère sur la voie à droite et enchaîne avec un rabattement SUR ego. Ego klaxonne. V_ins annule son changement de voie
9		2.3	0.389		N.A.	-4.2	Ego se déporte sur la voie à sa droite, poussant sur la bande d'arrêt d'urgence un véhicule qui s'y trouvait. Le véhicule double par la droite et s'insère juste devant.

Tableau 2 : SCE « rabattement forcé ».

Les 7 premiers SCE présentent des caractéristiques communes. V\_ins se rabat très près, et le conducteur du véhicule suiveur (ego véhicule) freine dès qu'il perçoit l'intention de déboitement,

systématiquement avant que le véhicule n'ait commencé à mordre la ligne (avant T2). Ce freinage à lieu très tôt, avant le début formel du changement de voie.

Ces rabattements forcés sont bien sur tous causés par la décision de rabattement du conducteur de V\_ins. Différentes circonstances peuvent cependant participer à l'explication de cette décision : rabattement d'une file plus lente (N°2, 3, 4, 6, 7), coincé derrière un camion (6), dans un enchaînement de changements de voie après une insertion pour rejoindre la voie de gauche (N°3), dès qu'autorisé par les pointillés après une ligne blanche (N°4). Dans ce dernier cas (N°4), la présence de la remorque derrière V\_ins pourrait avoir participé à un défaut de mesure de l'espace de rabattement. Dans le cas N°5, plus surprenant, un véhicule se rabat lentement sans adapter sa vitesse à la nouvelle voie plus rapide, semblant indiquer un manque de contrôle et de réactivité du conducteur.

Les 2 derniers cas (N°8 et 9) sont plus critiques dans le sens où V\_ins se rabat sur V\_suiv, amenant le risque direct d'un impact, ce qui semble indiquer un manque de contrôle visuel du conducteur de V\_ins (inattention, angle mort ...). Heureusement, les manœuvres ne mènent pas à l'impact. Dans le cas n°8, V\_ins enchaîne un rabattement juste après son insertion sur la voie rapide. Le conducteur de V\_suiv utilise son avertisseur sonore, ce qui a pu participer à la réalisation de la situation par le conducteur de V\_ins. Dans le cas n°9, l'ego véhicule est d'abord en fait V\_ins car il se rabat sur un véhicule (manque de contrôle visuel ?) qui se réfugie sur la bande d'arrêt d'urgence avant d'accélérer et de se rabattre à son tour devant lui (ce pour quoi cette séquence a été identifiée).

Ces SCE montrent bien l'**impact sécuritaire réactif de cette configuration « rabattement forcé »**, qui oblige le conducteur à réagir dans la gestion instantanée des trajectoires. Cette gestion dépend du positionnement, au moment t, de la trajectoire anticipée de rabattement et de la vitesse relative entre V\_ins et V\_suiv. La criticité de ce facteur est mesurée par un TTC, temps avant impact.

- Dans le cas le plus critique, la trajectoire anticipée du rabattement initié par V\_ins peut l'amener à percuter V\_suiv dès le changement de voie (en cas d'absence de contrôle). L'évitement de l'impact nécessite soit d'informer V\_ins pour qu'il annule la manœuvre (avertisseur sonore) ou que V\_suiv fasse une manœuvre d'évitement.
- La trajectoire en cours peut également permettre d'anticiper un impact une fois V\_ins installé dans la voie d'arrivée (si la vitesse de V\_ins est plus faible que celle de V\_suiv). L'évitement de l'impact demande soit à V\_ins d'accélérer, dans la limite de l'espace disponible devant lui, ou à V\_suiv de freiner. Dans les SCE « rabattement forcés », il est intéressant de noter que le freinage de V\_suiv a toujours été initié très tôt, avant que V\_ins ne franchisse la ligne. Cela signifie que le conducteur de V\_suiv a détecté le besoin de freiner dès la perception de changement de trajectoire du véhicule dans la voie à côté.
- Mais les réactions des conducteurs prennent également en compte une marge de sécurité, d'autant plus importante que le contrôle de leur véhicule et de la scène de conduite est relâché. Ainsi, par exemple, un véhicule rapide se rabattant devant V\_suiv, en pénétrant dans sa zone de sécurité, avec un TIV faible, peut être vécu comme une menace et amener un freinage alors bien même qu'à aucun moment il ne le touchera et que, par sa vitesse importante, il s'en éloignera rapidement.

La gestion de ces situations intempestives dépend alors :

- De leur détection la plus précoce possible (éventuellement à l'aide d'indices tels qu'un véhicule « pressé » venant de s'insérer, la fin d'une ligne blanche empêchant le changement de voie ...)
- De la réaction rapide du conducteur

- Le cas échéant, de l'information du danger apportée au véhicule s'insérant, dans le cas d'un problème de détection de sa part.

#### Configuration « Masquage d'un ralentissement » : impact sur la capacité d'anticipation

La seconde configuration associe plusieurs facteurs. Un véhicule s'insère devant le véhicule suiveur, alors qu'un ralentissement du trafic se profile à l'horizon (l'insertion peut éventuellement être déclenchée suite à la perception de ce ralentissement pour rejoindre une fois où la vitesse diminue moins). Avec un TIV raccourci, et gérant l'insertion, le conducteur de V\_suiv est surpris quand V\_ins freine.

Un exemple de cette configuration est présenté au Tableau 3.

**Tableau 3 : Exemple de séquence extraite d'une situation de masquage d'un ralentissement.**

Etape	Temps	Description
T0	Situation initiale T2-3s	L'égo véhicule (V_suiv) roule à 85 km/h sur une voie menant à une sortie (V men se trouve sur la même voie).
T1	711,2 sec	V_ins initie un changement de trajectoire pour se rabattre devant V_suiv
T2	712,8 sec	V_ins commence à franchir la ligne
T3	714 sec	V_ins est dorénavant situé dans la même voie que V_suiv
T3b	714,2 sec	V_ins freine en réaction du ralentissement de V men et des autres véhicules situés en amont de la voie congestionnée
T3c	714,5 sec	V_suiv perçoit le freinage de V_ins (mouvement du pied vers la pédale mais ne freine pas)
T3d	714,9 sec	V_suiv décide d'un changement de trajectoire pour éviter V_ins (mouvement brusque du volant vers la gauche)
T3e	715,8 sec	V_suiv frôle V_ins dans sa manœuvre d'évitement (à cet instant critique le TTC est de 1,25s) suivi d'un freinage stabilisé.
T3f	716,7 sec	V_suiv a terminé sa manœuvre d'évitement mais maintient son action sur la pédale de frein
T4	717,1 sec	V_suiv continue de ralentir afin de stabiliser sa vitesse dans la nouvelle voie (un véhicule au loin amorce un changement de voie pour se rabattre devant V_suiv)

Cette séquence est illustrée graphiquement dans la Figure 18.

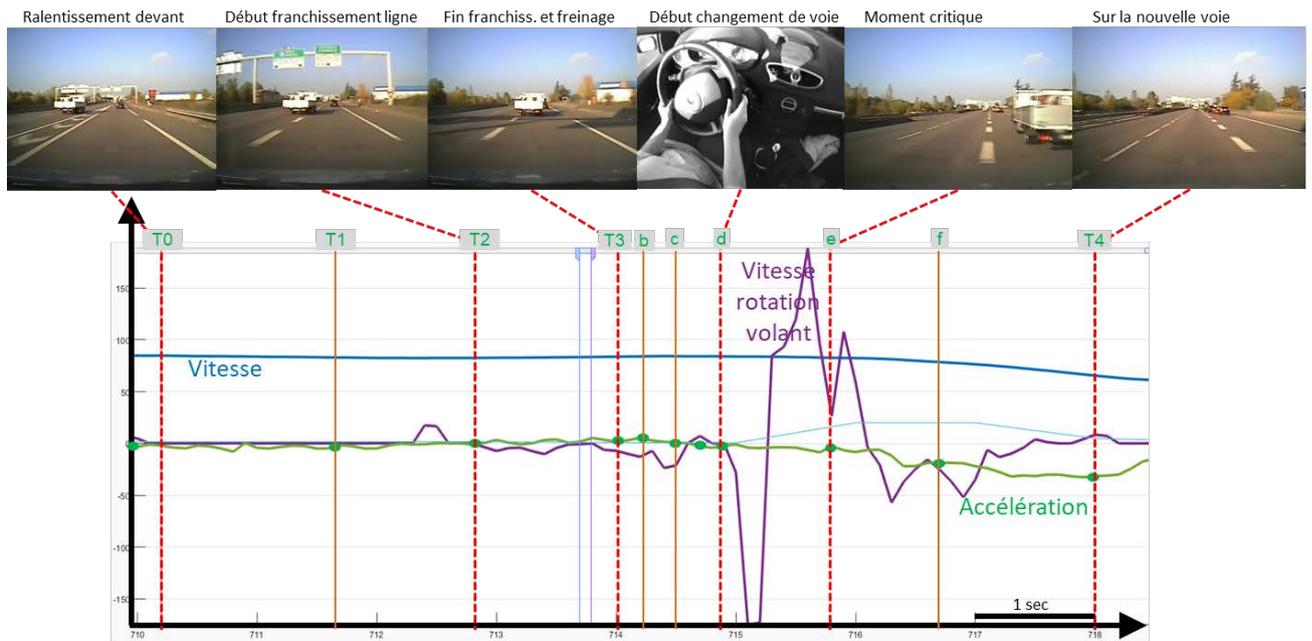


Figure 18 : Illustration d'une séquence de masquage d'un ralentissement.

Les 5 SCE de rabattements critiques restants, résumés dans le Tableau 3, se sont montrés comparables à cette configuration de freinage tardif.

Tableau 4 : SCE « masquage d'un ralentissement ».

N°	Scène de conduite	TIV avec V_lead	TIV avec V_Ins	TTC critique	Freine avant T2	$\Delta v$ (%km/h)	Description	Facteurs
1		0.873	0.269	1.9	TRUE	-21.3	Ego est sur la voie de gauche. Un ralentissement apparaît devant (feux stops). V_ins, sur la voie à droite, s'insère devant puis freine fort en raison du ralentissement. Ego freine.	- Ralentissement du trafic, - Irruption visuelle + masquage de scène avant
2		0.785	0.524	3	FALSE	-6.3	Ego est sur la voie de gauche. Un ralentissement apparaît devant (feux stops). V_ins, sur la voie à droite, s'insère devant puis freine fort en raison du ralentissement. Ego freine (tardivement)	- Ralentissement du trafic, - Irruption visuelle + masquage de scène avant - Heure avancée de la nuit (sommolence?)
3		1.6	0.7	1.25	FALSE	-8.0	Ego sur la voie de droite, menant à une sortie avec un ralentissement. Alors qu'ego fait ses contrôles visuels pour changer de voie, une camionnette s'insère, puis freine en raison du ralentissement. Ego, surpris, donne un coup de volant pour éviter V_ins.	- Ralentissement du trafic, - Irruption visuelle + masquage de scène avant
4		0.558	0.29	2	FALSE	0.3	Ego est sur la voie de droite, congestionnée et menant à une sortie. V_ins vient s'insérer juste devant et freine 2 sec plus tard. Ego freine	- Ralentissement du trafic, - Irruption visuelle + masquage de scène avant
5		2.6	2.2	2.25	FALSE	-22.7	Ego est sur la voie de gauche. Un ralentissement apparaît devant (feux stops). V_ins, sur la voie à droite, vient de s'insérer et est poussé par un véhicule s'insérant à son tour. Il s'insère devant puis freine en raison du ralentissement. Ego freine.	- Ralentissement du trafic, - Irruption visuelle + masquage de scène avant

Ces SCE présentent également des caractéristiques très communes. V\_ins, s'insère au moment où un ralentissement vient modifier la dynamique du trafic et annonce le besoin d'une adaptation. Dans les cas 1 et 2, V\_ins semble déboîter pour limiter sa perte de vitesse en rejoignant la voie qui serait la moins impactée par le ralentissement. Les cas 3 et 4 concernent l'insertion dans une file menant à une sortie avant que celle-ci ne deviennent compact (ce qui rend plus difficile l'insertion ensuite). Dans le dernier cas, le rabattement semble en plus motivé par un véhicule qui s'insère devant. Enfin, la réaction tardive dans le cas N°2, pourrait être impactée par un état de somnolence due à l'heure avancée de la nuit.

Ces SCE montrent bien le **second facteur sécuritaire, anticipatif**. L'anticipation se déroule dans un horizon temporel, devant le conducteur, qui constitue, typiquement, le temps de réaction qui lui est laissé pour freiner quand le véhicule devant freine. Cet horizon temporel est mesuré par le TIV – Temps Inter Véhicule, qui, d'après le code de la route, doit être maintenu à 2 sec. Un véhicule qui vient s'insérer à l'avant vient alors raccourcir cet horizon temporel, ce qui impact la capacité d'anticipation du conducteur du véhicule suiveur, qui se retrouve obligé de restaurer son horizon temporel, en réduisant sa vitesse.

Ce raccourcissement de l'horizon temporel est une baisse de la marge de temps de réaction du conducteur qui est normalement transitoire. Il constitue cependant un impact sécuritaire quand il est

associé à la survenue, à ce moment, d'un événement trafic nécessitant de réagir, comme dans la configuration identifiée du ralentissement de trafic :

- Le rabattement peut lui-même être provoqué par le ralentissement de trafic à l'horizon, alors que V<sub>ins</sub> change de voie pour choisir une supposée plus fluide.
- L'insertion amène un phénomène de masquage qui peut être de deux ordres :
  - Un véhicule imposant amène un masquage visuel en bloquant la perception du trafic devant.
  - L'insertion du véhicule peut également amener un masquage attentionnel, alors que le conducteur doit se focaliser sur la gestion du rabattement devant lui, qui l'oblige à restaurer son TIV voire à gérer un TTC.

La configuration de ralentissement de trafic est bien susceptible d'amener les différents ingrédients débouchant sur un incident : la fragilisation de l'anticipation du conducteur, des facteurs perturbateurs et un événement soudain à gérer.

Ces configurations et les facteurs de risques associés ont été utilisés dans la suite de l'analyse pour la guider et l'étendre sur l'ensemble de la base de données UDRIVE.

#### *Extractions des situations de rabattement de la base de données UDRIVE*

##### *Analyse quantitative.*

La partie suivante de l'étude a consisté à identifier dans UDRIVE et à analyser un grand nombre de situations de rabattement pour une étude quantitative. La base UDRIVE utilisée est décrite dans le livrable 3.1, pour rappel elle comporte 49.000 enregistrements totalisant 12 631 heures et 572 933 kilomètres. Environ 22% du total de ces enregistrements ont été effectués sur voies à chaussées séparées soit 2690 heures. Afin d'obtenir une analyse quantitative, une détection automatique par algorithmes des scènes de rabattement a été mise au point et exécutée sur cette base. Le principe de l'algorithme est explicité dans le livrable 3.3 : enrichissement des bases de données. Pour rappel, l'algorithme de détection de rabattement identifie les instants où le véhicule meneur a été remplacé par le véhicule s'insérant et que le Temps Inter Véhicule a baissé, en excluant les propres changements de voie de l'Ego-véhicule. Pour répondre aux besoins de l'étude, un enrichissement supplémentaire a été intégré pour ne garder que les rabattements avec l'existence d'un même véhicule meneur depuis au moins 2s avant l'insertion.

##### *Nombre & Qualité des détections.*

Sur la base considérée (2690 heures sur voie à chaussées séparées) 71368 rabattements ont été détectés, toutes conditions confondues. Pour répondre aux besoins de notre étude, les filtres suivants ont été appliqués : (Conditions (I))

- Le véhicule s'insérant est un véhicule léger
- L'Ego-véhicule est en mouvement
- L'Ego-véhicule suit un même véhicule meneur depuis 2s (i.e. : pas de changement de l'identifiant du véhicule meneur dans les 2s précédent l'insertion)
- La scène se déroule dans une section courante de voie à chaussées séparées, c'est-à-dire :
  - o Sans intersection (bretelle d'accès/sortie),
  - o Sans péage,
  - o Sans virage manifeste.

24 676 rabattements correspondant à ces critères ont été détectés. L'ensemble de cette étude porte sur l'analyse de ces 24 676 rabattements intervenant lorsque le véhicule suiveur suit un véhicule meneur. Afin d'évaluer la qualité de cette détection, une validation manuelle d'un échantillon tiré

aléatoirement a été réalisée, à l'aide d'enregistrements vidéo synchrones. Chaque échantillon est validé si et seulement s'il respecte les critères suivants : (Conditions (II))

- L'Ego véhicule subit un rabattement,
- Le véhicule s'insérant est un véhicule léger,
- L'ego véhicule suit un véhicule meneur avant le rabattement.

L'échantillon annoté comporte 102 scènes respectant les conditions (I). Le résultat obtenu est le suivant :

Vrais Positifs :	N = 94
Faux Positifs :	N = 8
Total :	N = 102

Cette annotation permet d'estimer la précision à 92%. En considérant que la taille de l'échantillon est négligeable devant la taille de la population (102 contre 24 776), nous pouvons estimer la marge d'erreur à 95% de la façon suivante :

$$Marge = Z \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$$

Avec Z le seuil de confiance désiré, p, la proportion de résultat dans l'échantillon, et n la taille de l'échantillon. Cette relation donne une marge d'erreur à 5% avec 95% de confiance. C'est-à-dire qu'on a une précision de 92% plus ou moins 5%, avec 95% de confiance.

**Découpage temporelle des détections.** Les rabattements sont identifiés à partir des détections automatiques d'obstacles par une caméra intelligente installée à l'avant de l'Ego-véhicule. Cette caméra possède certaines caractéristiques limitant ses capacités de détection, comme notamment son ouverture angulaire. Ci-après (Figure 19) une représentation graphique du cône de détection réelle de l'instrumentation.

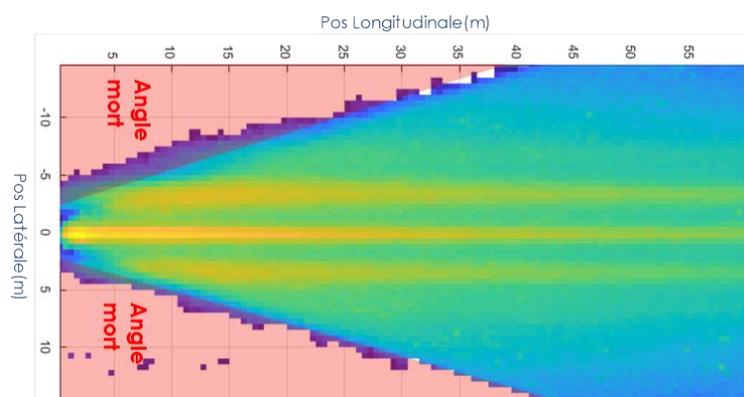


Figure 19 : Cartographie des positions des obstacles détectés par la caméra intelligente

L'échelle colorimétrique est logarithmique. Plus la couleur est proche du jaune, plus le nombre d'obstacles détectés à cette position (x,y) est important. On observe très peu de détection sur les voies adjacentes (+/- 5m en latérale) à moins de 5 m devant (Longitudinale). C'est justement la zone de départ des rabattements serrés. Cette ouverture réduite du cône de détection implique une détection difficile des obstacles qui sont proches de l'égo-véhicule et sur une voie adjacente. En conséquence, si la détection des rabattements au moment où celui-ci intervient (T3) est possible, il est

difficile de « remonter » dans le passé pour obtenir les caractéristiques de la manœuvre dès son initiation et notamment le moment du début du franchissement (T2).

L'instant du début de la manœuvre est alors défini en enrichissant la base de données (cf. livrable 3.3). Pour rappel, il correspond :

- Au dernier instant où est détectée une vitesse latérale nulle de l'obstacle avant le rabattement ; c'est-à-dire au début du mouvement latéral du véhicule s'insérant.
- Si une vitesse latérale nulle n'est jamais mesurée, alors le début de la manœuvre considéré est estimé au moment de l'apparition de l'obstacle par la caméra intelligente, dans la limite de 4s avant le franchissement.
- Si l'obstacle n'est pas détecté ou plus de 4s avant le franchissement, la valeur est de 4s.

Ci-dessous (Figure 20), la distribution des proportions du rabattement en fonction de la durée entre la détection du début, estimé, de la manœuvre (T1) et la fin, détectée, du franchissement de ligne (T3).

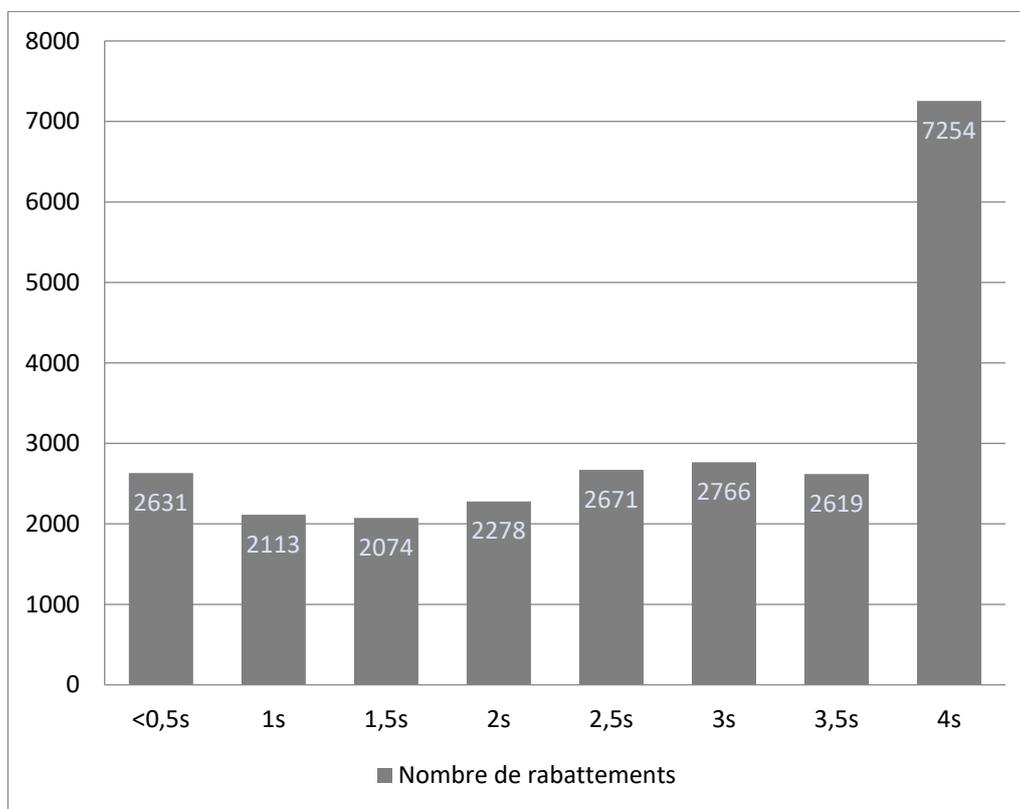


Figure 20 : Nombre de rabattements en fonction de la durée entre le début de la manœuvre et le franchissement de ligne

Pour 30% des scènes le début de la manœuvre n'a pas réussi à être estimé sans ambiguïté et a donc été estimé à 4s avant la fin du franchissement de ligne (T3).

#### Caractérisation des rabattements « agressifs »

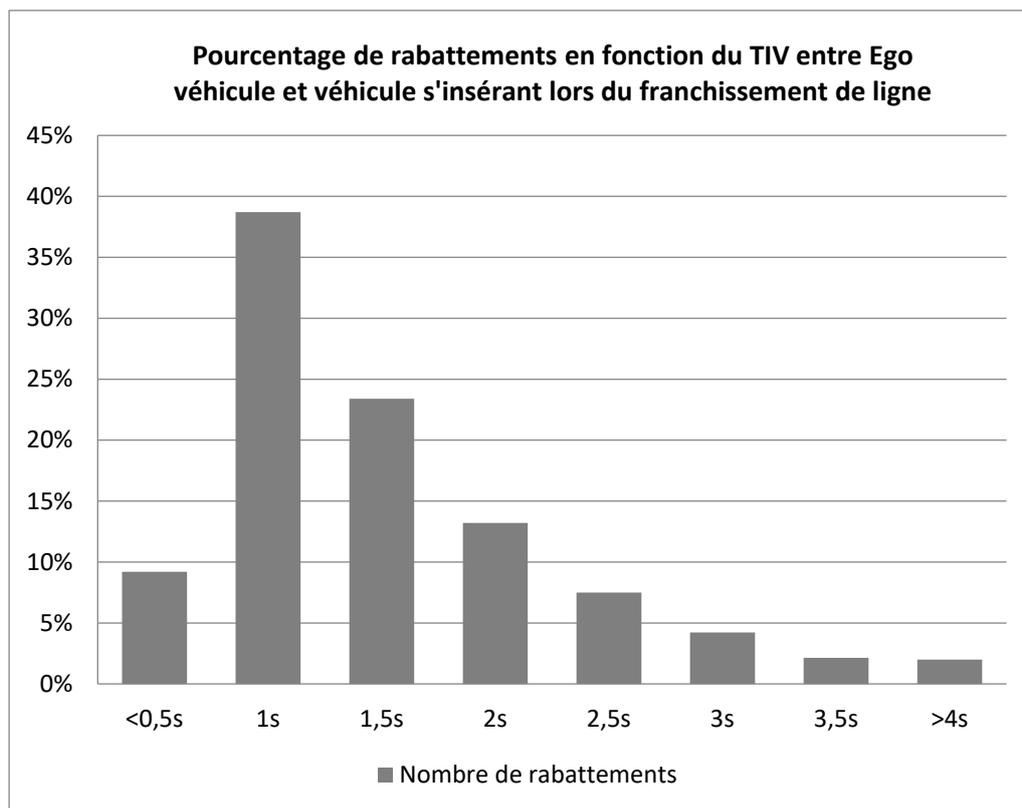
Une part très importante des rabattements ne présente heureusement pas d'impact au niveau sécuritaire pour le véhicule suiveur. Il convient d'ailleurs de préciser que parmi les 24 676 rabattements subis aux cours des 2690 heures enregistrées sur Voies à Chaussées Séparées aucun n'a donné lieu à un accident de la circulation. Cependant, il est tout même possible de catégoriser les rabattements subis en fonction du risque qu'ils ont engendré, à condition d'identifier les critères permettant de quantifier ce risque. Pour les besoins de notre étude, plusieurs de ces critères ont été étudiés :

- Le Temps Inter Vehicule (TIV).

- Le TTC.
- Le freinage de l'Ego-véhicule.

#### Temps Inter Véhicule.

Le Temps Inter Véhicule (TIV) correspond à la distance de sécurité entre l'Ego-véhicule et le véhicule s'insérant, à l'instant de l'insertion. La distribution de la proportion de rabattement suivie en fonction de ce temps inter véhicule est donnée à la Figure 21.



**Figure 21 : Pourcentage de rabattements en fonction du TIV entre Ego véhicule et véhicule s'insérant lors du franchissement de ligne**

Le pic de proportion de rabattements subis intervient à un TIV d'environ 1s, soit bien en dessous des 2s de la distance de sécurité préconisée. Globalement, 67% des rabattements se font à une distance inférieure ou égale à cette valeur cible de 2s. On ne peut cependant pas affirmer que les 2/3 des rabattements subis sont agressifs ou ont un impact sur la sécurité de l'Ego-véhicule. La raison principale en est que le critère TIV ne prend pas en compte la vitesse relative. Il ne permet donc pas de distinguer, dans les rabattements juste devant l'Ego véhicule, ceux ayant nécessités une action du conducteur et ceux par un véhicule s'insérant avec une vitesse relative suffisante pour dégager rapidement l'espace et n'ayant eu pas ou peu d'impact pour l'Ego-véhicule. Si le TIV est donc incomplet pour juger de l'agressivité d'une mesure, il est pertinent de le considérer pour juger de l'apparition de conditions « inconfortables » de conduite. En effet, si un TIV faible ne préjuge pas d'une collision à venir, cela reste des conditions dangereuses dont il est important de limiter les conditions d'apparitions.

#### Time To Collision

Le TTC permet justement d'intégrer la différence de vitesse s'insérant et l'Ego véhicule. Tout comme le Temps Inter Véhicule, il s'agit d'une donnée continue qui peut être calculée à tout instant du

rabattement. Si le TIV étudié est sélectionné à l'instant précis de l'insertion, la valeur pertinente du TTC correspond au minimum atteint par celui-ci, qui peut être atteint avant, pendant, ou après l'insertion. Or, il est à noter que seul les distances et vitesses **longitudinales** sont considérées car le TTC s'applique aux objets dans la voie de l'ego véhicule et indique donc le temps avant une hypothétique collision **frontale**. Dans le cadre de notre étude, comme montré dans l'analyse qualitative des rabattements forcés, les manœuvres d'évitement, et notamment un éventuel freinage, peuvent être réalisées par anticipation avant même le début formel de la manœuvre de rabattement. Dans ces situations, lorsque le véhicule s'insérant de manière forcée est arrivé dans la voie devant V\_suiv, sa vitesse peut être devenue supérieure à celle de l'ego (en raison de son accélération et du freinage d'ego). Leur TTC sera alors calculé comme infini, ce qui ne permet pas de détecter la criticité de la scène. C'est pourquoi nous calculons le TTC entre l'Ego Véhicule et le Véhicule s'insérant sur toute la durée de la manœuvre (entre T1 et T4), y compris avant que le véhicule soit effectivement dans la voie d'ego véhicule. Nous proposons une illustration de ce concept à la Figure 22.

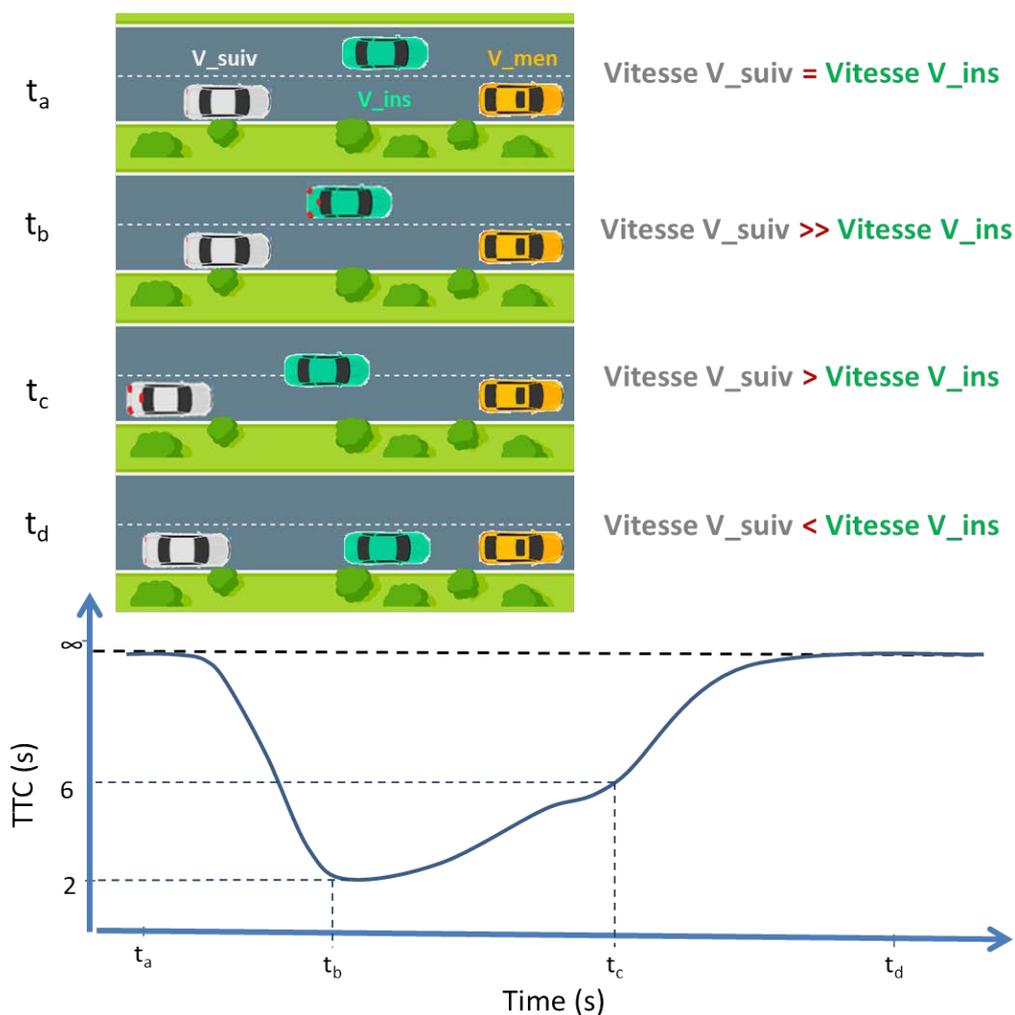


Figure 22 : Illustration de l'évolution du TTC lors d'une manœuvre de rabattement.

Le découpage temporel de cette scène donne le scénario suivant :

- Lorsque  $t = t_a$ , le véhicule s'insérant et l'Ego véhicule ne sont pas sur la même voie, le TTC ne s'applique pas. Il est cependant possible de calculer le TTC "virtuel" en considérant la distance

et vitesse relative longitudinale. Cette vitesse relative étant nulle (les 2 véhicules vont à la même vitesse) le TTC est infini.

- Lorsque  $t = t_b$ , suite à un freinage du véhicule s'insérant, la distance entre les 2 véhicules diminue et la vitesse relative est inférieure à 0, le véhicule suiveur va plus vite que le véhicule s'insérant. Le TTC peut donc prendre une valeur finie, en l'occurrence 2s sur l'illustration présentée. A noter qu'il s'agit du TTC "virtuel" les 2 véhicules n'étant toujours pas dans la même voie.
- Lorsque  $t = t_c$ , le véhicule s'insérant effectue sa manœuvre de rabattement, et rentre dans la voie de l'Ego véhicule. Entre temps l'ego véhicule a adapté sa vitesse et le TTC est remonté à 6s.
- Lorsque  $t = t_d$ , le véhicule s'insérant a une vitesse supérieure ou égale à l'Ego-véhicule, leur TTC reprend une valeur infinie. Durant tout cette situation, la valeur minimum du TTC a été atteinte avant que le véhicule s'insérant soit effectivement dans la même voie, lorsque  $t = t_b$ . C'est cette valeur de 2s qui caractérise la situation.

Ce calcul de TTC minimum entre T1 et T4 est effectué sur l'intégralité des 26 129 rabattements avec suivi d'une cible détectée sur la base UDRIVE. Dans 60% des cas un TTC n'est soit jamais atteint, soit ne passe jamais en dessous de 20s. Cela correspond aux situations où la vitesse relative du véhicule s'insérant est supérieure ou égale à 0 ou très proche de 0 durant toute la manœuvre. Pour les 40% des scènes où un TTC est calculable, la distribution des TTC minimum atteint est donnée à la Figure 23.

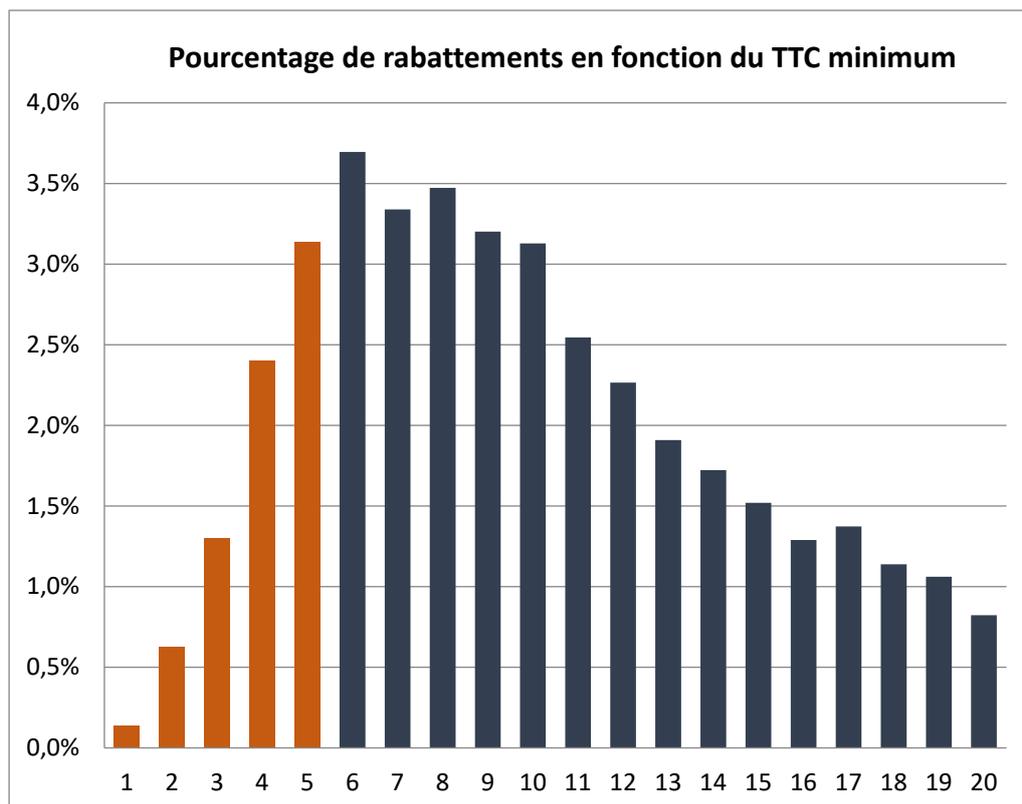


Figure 23 : Distribution des rabattements en fonction du TTC minimum.

Parmi les rabattements avec un TTC inférieur à 20s, on remarque un plateau pour le nombre d'occurrences à partir d'un TTC minimal de 5s, avant une décroissance du nombre d'occurrences. Cela correspond à un TTC nécessitant une manœuvre dans un bref délai sans être un risque critique. Ce

seuil de 5s est retenu pour faire la distinction entre les rabattements “sans impacts sécuritaire” et ceux avec un impact. Cela correspond à une proportion de 7.6% des rabattements soit 1878 scènes différentes. Pour la suite de l'étude nous considérerons ces 2 classes mutuellement exclusives :

- Les rabattements agressifs, dont le TTC minimal est inférieur ou égale à 5s. Ils seront représentés en **Orange**.
- Les Rabattements nominaux, dont le TTC minimal est supérieur à 5s. Ils seront représentés en **bleu**. Sont inclus tous les rabattements ne faisant pas partie de la classe précédente, soit 227798 scènes.

### Réduction de vitesse de l'Ego-véhicule.

La réduction de la vitesse de l'Ego-véhicule peut également être considérée pour identifier les rabattements agressifs en caractérisant la réponse du conducteur de l'Ego-véhicule sur le contrôle longitudinal, c'est à dire sur la variation de vitesse durant la durée de manœuvre.

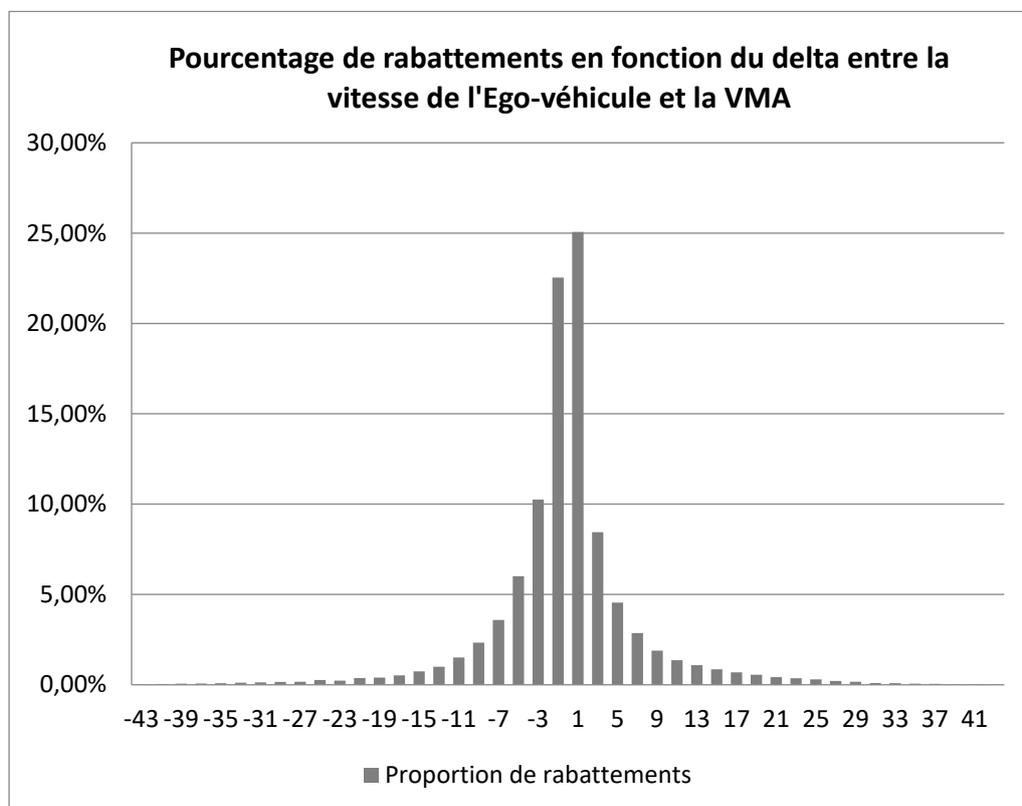
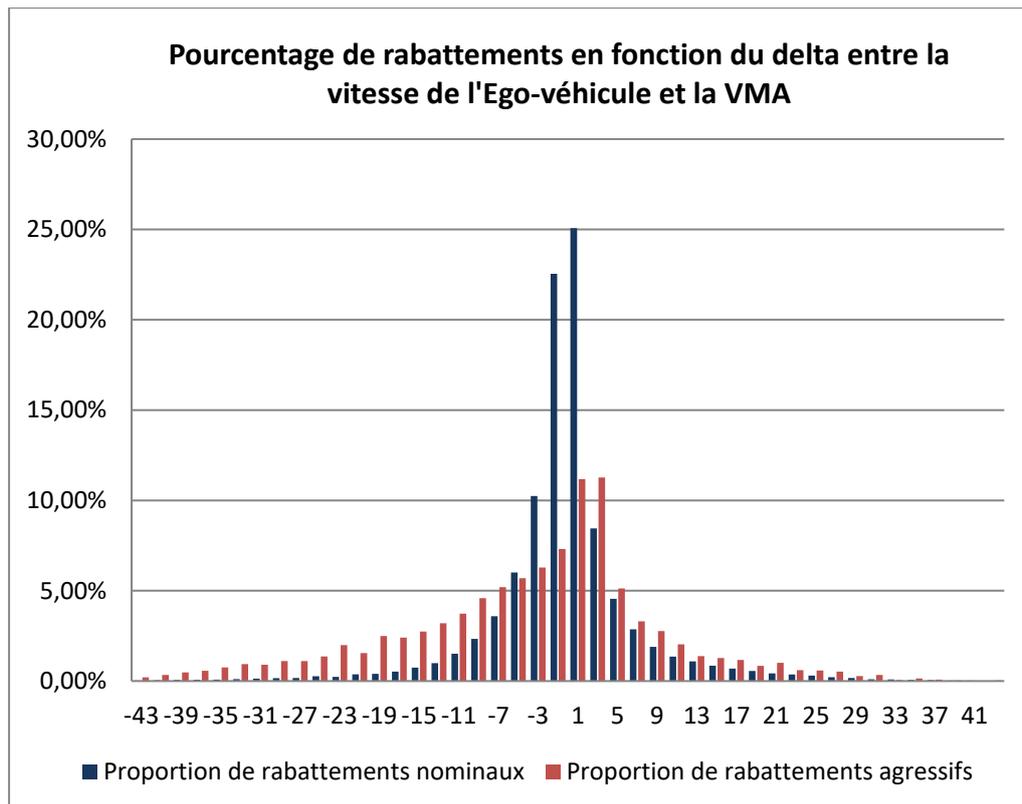


Figure 24 : Distribution des rabattements en fonction du delta entre la vitesse de l'Ego-véhicule et la VMA.

La distribution obtenue (Figure 24) est presque parfaitement centrée en 0, c'est à dire qu'il n'y pas d'impact mesurable des rabattements sur la variation de la vitesse de l'ego véhicule. La moyenne et la médiane de cette distribution sont respectivement  $-0.14$  m/h et  $-0.01$ km/h. Cela montre qu'une grande majorité des rabattements s'inscrivent dans la variation du flux de circulation et n'ont aucun impact pour l'Ego véhicule et sa vitesse. Statistiquement, il y a autant de chance de freiner que d'accélérer pendant ces manœuvres. La perte de vitesse ne permet pas seule d'identifier les rabattements agressifs. En revanche, il est intéressant d'étudier les différentes distributions de variation de vitesse de l'Ego-véhicule en fonction du critère de TTC calculé précédemment (Figure 25).

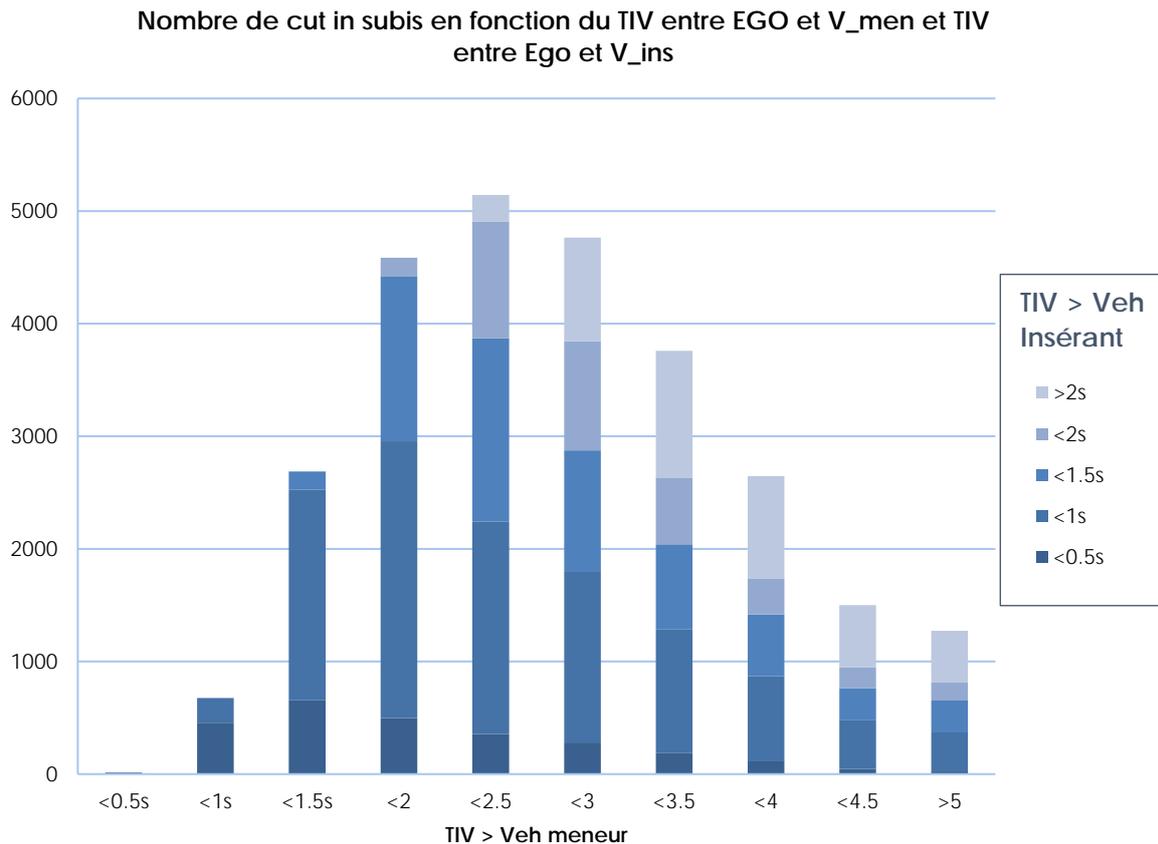


**Figure 25 : Distribution des rabattements en fonction du delta entre la vitesse de l'Ego-véhicule et la VMA, et le type de rabattement (critère TIV).**

Les rabattements nominaux étant majoritaires (93%) la distribution bleue est très proche de la précédente, qui regroupait tous les rabattements confondus. La distribution orange correspond à la distribution de variation de vitesse uniquement pour les rabattements avec un TTC minimum inférieur à 5s. Cette distribution est asymétrique, avec une prépondérance de variation de vitesse négative, et une variation moyenne de  $-8\text{km/h}$  (contre  $-0.14\text{km/h}$ ). Cette asymétrie est logique et montre l'impact des rabattements agressifs sur la trajectoire de l'Ego-véhicule, obligeant plus fréquemment ce dernier à réduire sa vitesse. Cela permet également de confirmer la pertinence du TTC minimum atteint lors d'une manœuvre pour catégoriser un rabattement comme étant agressif.

#### *Conditions d'apparitions des rabattements « agressifs »*

Les rabattements précédemment identifiés comme agressifs ont plus de chance d'intervenir dans certaines conditions, qu'il faut chercher à éviter pour le véhicule autonome. Le premier facteur analysé est la distance inter-véhicule entre le véhicule suiveur et le véhicule meneur, avant que le rabattement n'intervienne. Cette distance correspond à l'espace disponible où le véhicule s'insérant peut s'insérer. Ci-dessous (Figure 26), une distribution sur l'ensemble des rabattements (agressifs et nominaux) du TIV au véhicule s'insérant en fonction du TIV au véhicule meneur, à T3.



**Figure 26 : Nombre de cut-in en fonction du TIV.**

La couleur des histogrammes représente le TIV entre l'Ego véhicule et le véhicule s'insérant au moment où celui-ci devient le nouveau véhicule meneur (T3). Sur l'axe des abscisses on retrouve le TIV entre l'Ego véhicule et le véhicule meneur. Plusieurs observations peuvent être tirées de ce graphique :

- La gauche du graphique correspond aux rabattements subis alors que le Temps Inter Véhicule entre l'Ego-véhicule et le véhicule meneur est faible. De facto, l'intégralité des rabattements dans cette situation se fait avec une distance faible entre Ego-véhicule et le véhicule s'insérant, car il y a peu d'espace disponible. Il s'agit des cas typiques de situations de trafic dense avec un rabattement « forcé ».
- Le pic du nombre de rabattements subis, toutes conditions confondues, intervient avec une distance inter véhicule de l'ordre de 2.5s ce qui correspond à des conditions nominales de conduite. A cette distance environ la moitié des rabattements subis se font à une distance faible, inférieure à 1s.
- Quelle que soit la distance laissée devant l'Ego-véhicule, celui-ci subit toujours des rabattements proches, bien que plus d'espace est disponible pour le véhicule s'insérant. Au-delà de 2.5s la proportion de ces rabattements est stable, aux alentours de 50%.

Tel que discuté précédemment, le Temps Inter Véhicule entre l'Ego-véhicule et le véhicule s'insérant ne prennent pas en compte la vitesse relative. Ainsi 74% des rabattements se faisant à moins d'1 seconde du véhicule suiveur se font avec une vitesse relative supérieure ou égale à 0, permettant au véhicule s'insérant de dégager rapidement l'espace, limitant ainsi l'impact pour l'égo véhicule. Nous proposons d'étudier la proportion de rabattement subis, toujours en fonction du Temps Inter Véhicule

relatif au véhicule mineur, en distinguant les rabattements ayant entraîné un TTC faible (Figure 27).

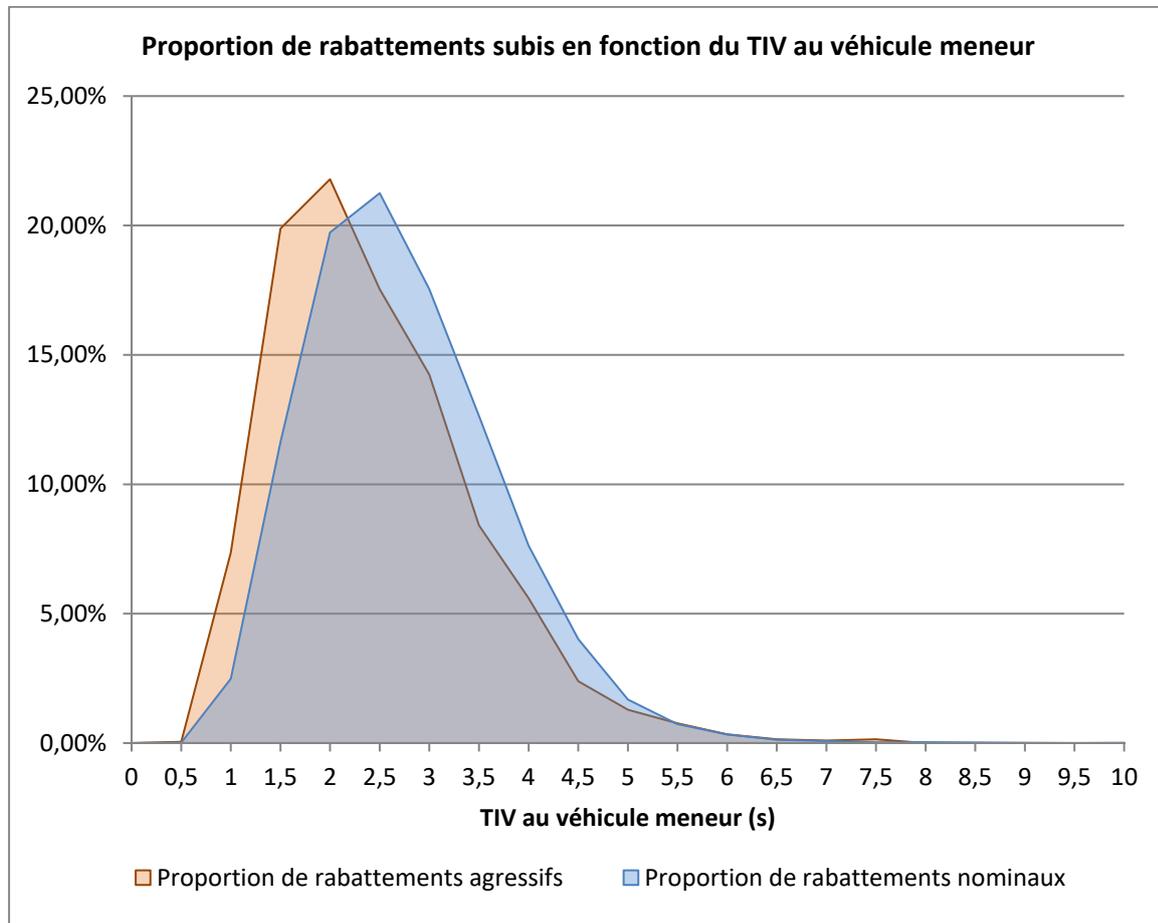


Figure 27 : Distribution des rabattements subis en fonction du TIV.

Plusieurs observations peuvent être menées sur ces distributions :

- Les 2 distributions ont des allures très proches ...
- ...avec un décalage notable vers la gauche des rabattements se faisant avec un TTC faible. Ce décalage correspond à une augmentation du risque de subir un rabattement agressif lorsque la distance de sécurité entre l'Ego-véhicule et le véhicule mineur se réduit.
- La partie gauche du graphique correspond aux rabattements subis alors que la distance de sécurité est faible. C'est dans ce type de situations que l'Ego véhicule subit le plus de rabattements agressifs. A noter que l'Ego véhicule n'est pas responsable de la dégradation des distances de sécurité lorsque le trafic se densifie.
- Une majorité des rabattements subis (81% pour les rabattements agressifs, 72% pour les nominaux) interviennent lorsque la distance de sécurité au véhicule mineur est inférieure à 3s. En augmentant cette distance, on peut réduire le nombre de rabattements subis.
- Cependant, une proportion non négligeable de rabattements agressifs est subie lorsque la distance de sécurité est élevée (10% au-dessus de 4s, 33% au-dessus de 3s).

Cette configuration correspond aux cas de déboitements de véhicule depuis une file lente observés dans l'analyse qualitative. Même si le TIV est important, le fort écart de vitesse amène un TTC faible.

#### Impact du trafic

Afin de quantifier l'impact du trafic sur la probabilité de subir un rabattement agressif, l'indicateur choisi est l'écart entre la vitesse de l'égo véhicule et la vitesse maximale autorisée. Si cet écart est important, cela signifie que le trafic est suffisamment dense pour empêcher l'égo véhicule d'atteindre la VMA (Figure 28).

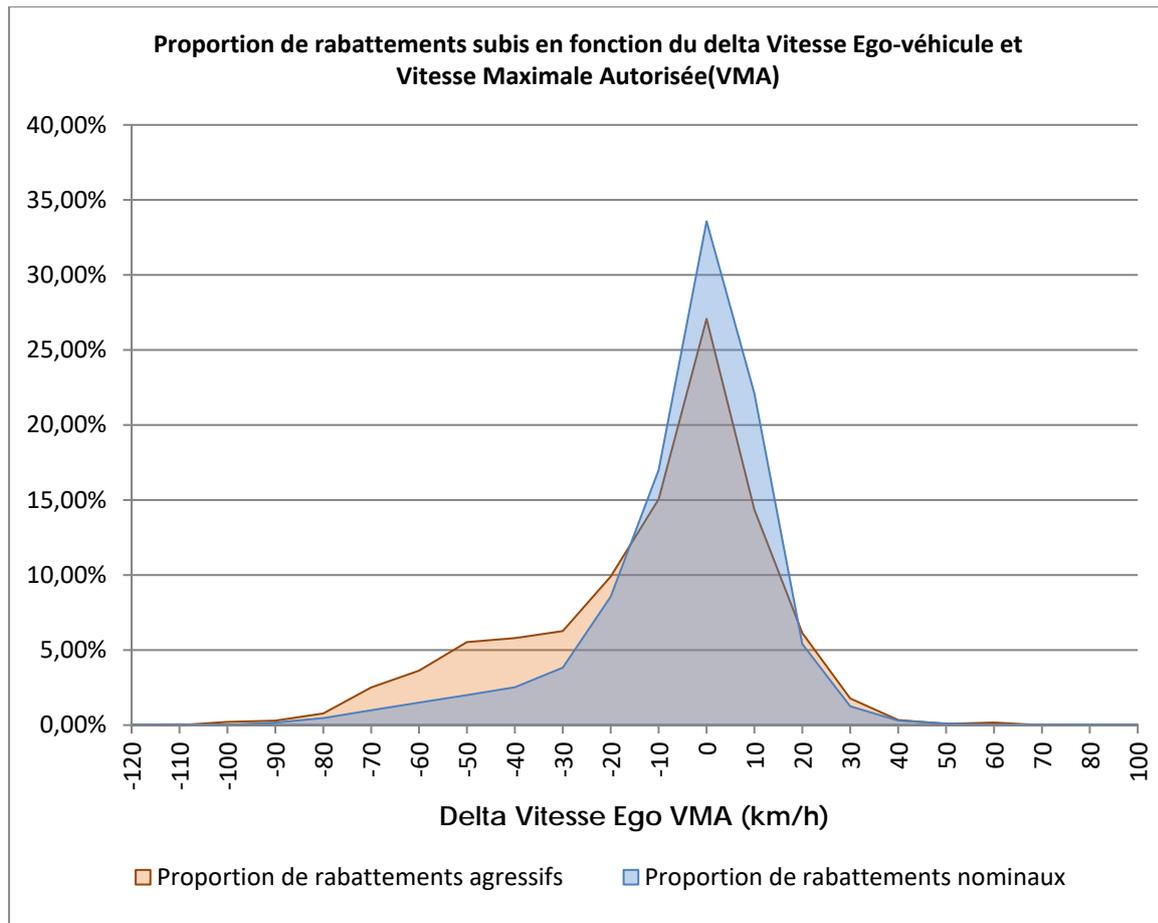


Figure 28 : Distribution des rabattements subis en fonction du delta Vitesse Ego-Véhicule.

Plusieurs observations peuvent être menées sur ce résultat :

- Le pic de la proportion de rabattements subis intervient lorsque l'Ego véhicule circule à la vitesse maximale autorisée, ce qui est la situation la plus fréquente.
- A droite de ce pic correspondent les situations en excès de vitesse de l'Ego-véhicule. Ces situations ne sont pas concernées par notre étude, la recommandation étant bien évidemment de respecter le code de la route, y compris les limitations de vitesse
- Lorsque le delta de vitesse ego-VMA est compris entre -70km/h et - 30 km/h, la proportion des rabattements agressifs est plus importante que celle des rabattements non agressifs. Or, ces valeurs de delta correspondent justement à la phase de densification du trafic, à l'arrivée

ou la sortie d'un bouchon. C'est bien lors de ces phases qu'il faut anticiper des éventuels rabattements agressifs.

#### *Réaction de l'Ego-véhicule lors des rabattements « agressifs »*

Les réactions des conducteurs face à ces rabattements « agressifs » montrent les modes de protections qui permettent de gérer l'incident et d'éviter l'impact. Elles fournissent des indications utiles pour fournir des recommandations.

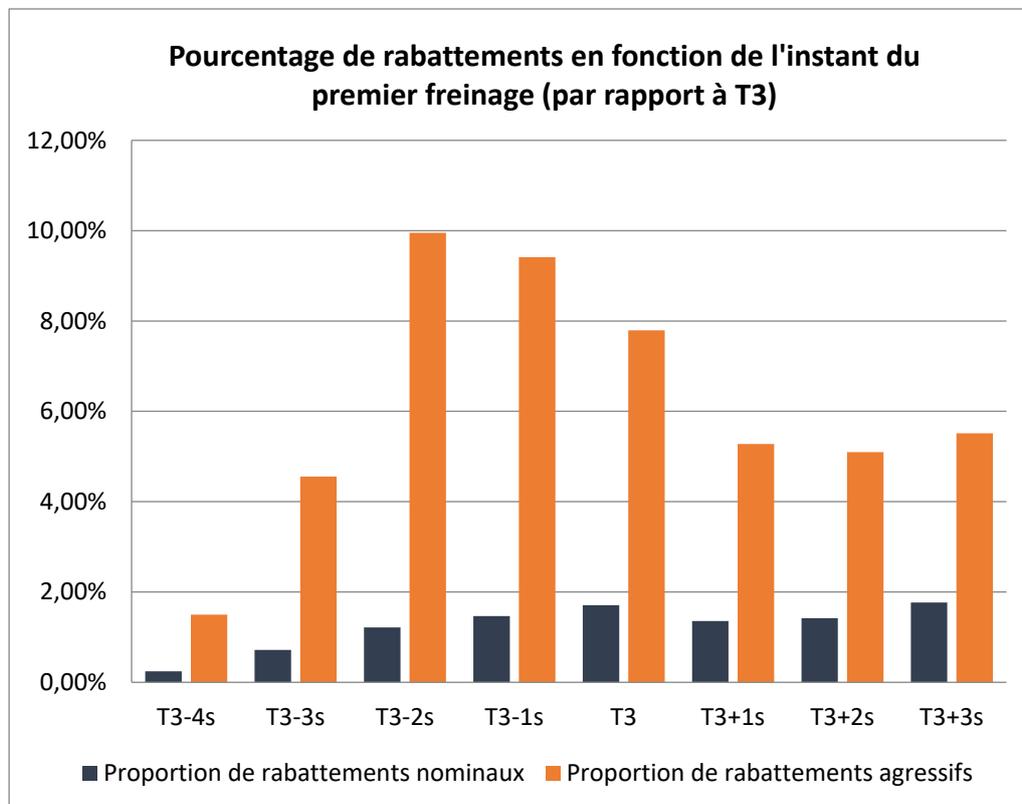
#### Freinage en amont du rabattement

Les rabattements subis par l'égo n'entraînent pas forcément une utilisation des freins chez celui-ci. Le conducteur a recours au frein dans seulement 10 % des rabattements nominaux et dans 36% des rabattements agressifs (Tableau 4).

**Tableau 5 : Fréquences des freinage en amont du rabattement.**

Classe de rabattements	Nominaux	Agressifs
Ego ne freine pas	22316	1260
Ego Freine	2254	805

Il est attendu d'observer un recours aux freins plus fréquents pour les rabattements agressifs. Pour analyser l'anticipation des conducteurs, il convient d'étudier à quel instant ce freinage intervient. La Figure 29) indique la proportion de rabattement en fonction de l'écart de temps entre le premier freinage, et le franchissement de ligne du véhicule s'insérant, pour les deux classes de rabattements :



**Figure 29 : Distribution des rabattements en fonction de l'instant du premier freinage.**

Le recours au frein est plus fréquent pour les rabattements agressifs, quel que soit l'instant du déclenchement de freinage. On observe surtout un recours au frein relativement plus important au début de la manœuvre pour les rabattements agressifs. Ainsi, le conducteur utilise ses freins 8 fois plus 2s avant T3 (franchissement de ligne du véhicule s'insérant) quand le rabattement est agressif, contre « seulement » 3 à 4 fois plus lorsque le freinage intervient 2s après T3. Cette utilisation précoce des freins pour les rabattements agressifs se retrouve dans l'analyse de la distribution de l'écart de temps entre l'utilisation des freins et l'insertion du véhicule (Tableau 6).

**Tableau 6 : Paramètres de distribution de l'instant du premier freinage selon le type de rabattement.**

	Rabattements agressifs	Rabattements Nominiaux
Q1	- 1.7s	- 1.2s
Q3	+ 1.2s	+ 2.1s
Mean	- 0.2s	0.4s
Median (Q2)	- 0.5s	0.4s

Ainsi, pour 50% des rabattements agressifs ayant entraîné un freinage, ce freinage est intervenu avant 0.5s avant T3. Pour les rabattements nominiaux, ce seuil de 50% est atteint 0.4 après T3. En analysant le nombre de situations en fonction de l'instant du freinage, en considérant 3 plages de temps, on obtient les résultats indiqués au Tableau 7 et à la Figure 30.

**Tableau 7 : Fréquences des temps de freinages selon 3 plages de temps.**

	<i>Nominal</i>	<i>Agressif</i>
<i>Avant T2</i>	<i>493</i>	<i>289</i>
<i>Entre T2 et T3</i>	<i>490</i>	<i>179</i>
<i>Après T3</i>	<i>1271</i>	<i>337</i>

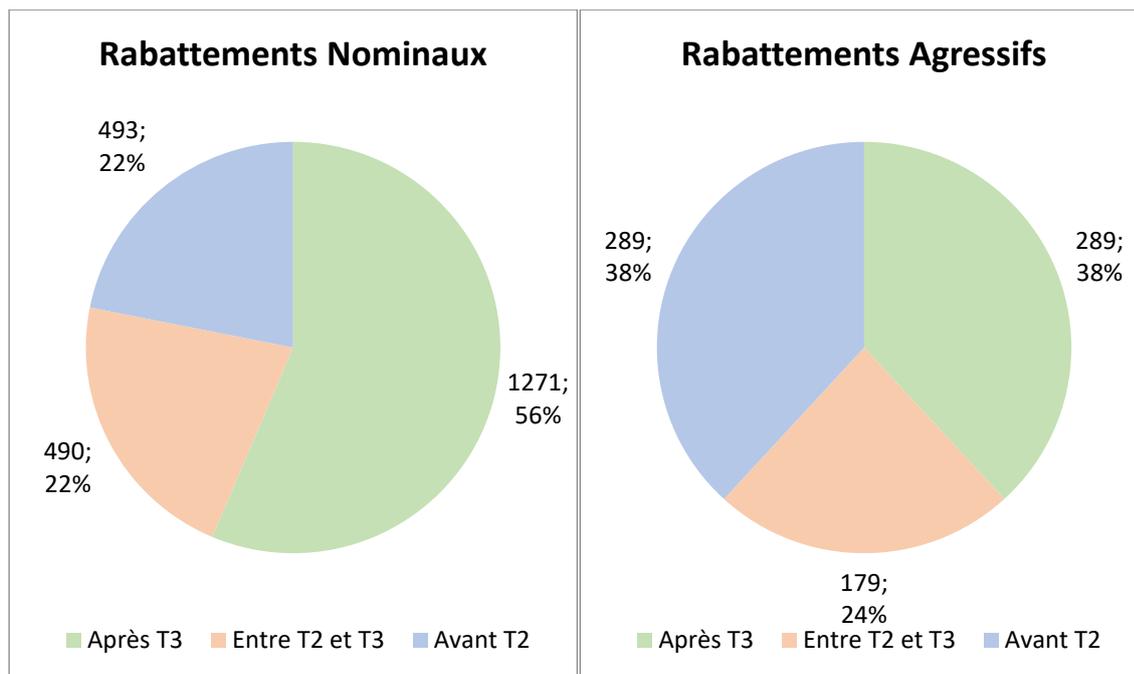


Figure 30 : Visualisation de la répartition des temps de freinage selon 3 catégories.

Un freinage en amont de la part du conducteur avant le franchissement permet de gérer les rabattements agressifs et de réduire les risques de collisions. A noter qu’une anticipation efficace permet même de désamorcer des situations avant qu’elles ne deviennent accidentogènes, c’est-à-dire avant même qu’un TTC minimal inférieur à 5s ne soit atteint.

Ces résultats permettent bien de conforter les observations menées dans l’analyse qualitative qui distinguait les cas de rabattements « forcés », nécessitant une réaction anticipée, et le « masquage » par un rabattement, nuisant à l’anticipation d’un freinage brusque. Ainsi, sans surprise, la proportion de rabattements où le conducteur freine est très fortement supérieure dans le cas des rabattements agressifs (36% VS 10%).

Dans le cas des rabattements non agressifs, la majorité des freinages arrive après la fin de la manœuvre, ce qui pourrait soit être dû à un ralentissement du trafic ou à une reconstitution tardive du TIV. Dans le cas des rabattements agressifs, le temps de freinage est nettement plus distribué avec 36% de freinage avant le franchissement de la ligne, correspondant au cas de rabattement forcé dans l’analyse qualitative et 41,9% de freinage après l’arrivée du véhicule dans la voie, qui correspond à la configuration du rabattement masquant un ralentissement.

**Signaler sa position**

Deux éléments sont principalement à la disposition des conducteurs pour signaler la présence de leur véhicule aux autres utilisateurs : l’avertisseur sonore et les appels de phare. Dans la base de données UDRIVE, seul le recours aux appels de phare est enregistré et peut être analysé.

L’utilisation des appels de phare pendant un rabattement est rare, seuls 53 situations sur les 24 676 disponibles. Il est en revanche bien plus fréquent lors des rabattements agressifs

Types Rabattement	Nombre rabattements	dont appels de phares	Proportion appels de phares (%)
-------------------	---------------------	-----------------------	---------------------------------

<b>Nominaux</b>	22798	39	1.7
<b>Agressifs</b>	1878	14	7.5
<b>Total</b>	24676	53	2.1

A noter que l'on considère uniquement les appels de phares intervenant avant la manœuvre (entre T1 T3) et non ceux intervenant après T3 afin d'exclure les appels de phare « protestation » visant à exprimer le mécontentement du conducteur. Si l'écart de fréquence d'utilisation est important et significatif ( $p < 0.05$ ,  $CI > 99\%$ ), la rareté de l'évènement ne permet pas d'analyse approfondie. On peut aussi noter que cette approche ne permet pas de garantir à 100% qu'aucun des appels de phares retenus ne correspondent pas tout de même à des « protestations ».

En signalant sa présence, l'Ego-véhicule peut également désamorcer la scène en annulant le rabattement initié. Cela intervient quand le véhicule s'insérant n'avait manifestement pas repéré l'ego véhicule (inattention, angle mort). Dans ce cas la manœuvre est annulée et le rabattement n'a pas lieu. Par définition, ces situations ne sont donc pas incluses dans cette étude, le rabattement n'ayant jamais eu lieu. C'est le cas de la scène illustrée à la Figure 31, détectée via l'utilisation des appels de phare.

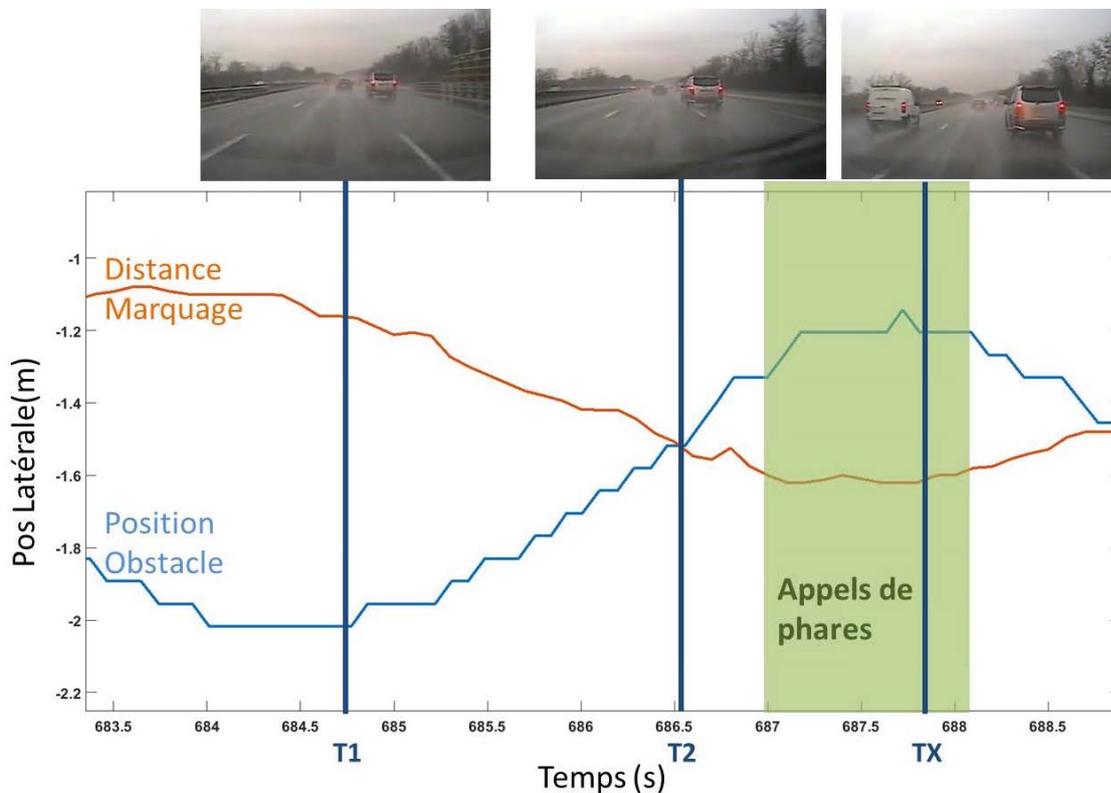


Figure 31 : Exemple de scène de rabattement avorté suite à un appel de phare.

La scène comporte 3 moments clefs :

- A  $t=T1$ , on a le début du mouvement latéral de  $V_{ins}$  avec une diminution de la valeur absolue de sa position latérale
- A  $t=T2$ , la valeur absolue de la position latérale de l'obstacle devient inférieure à la distance au marquage, ce qui correspond au début du franchissement de ligne.

- A  $t = TX$ ,  $V_{ins}$  repère enfin l'Ego-véhicule, peut être grâce aux appels de phare, et repart vers sa voie d'origine. A cet instant l'obstacle se situe à 14.4m et a une vitesse relative de -5.4m, ce qui correspond à un TTC de 2.7s

Si elle est intéressante, cette analyse de l'étude de l'utilisation des appels de phare reste limitée par le faible nombre d'occurrences. L'analyse de l'utilisation de l'avertisseur sonore semble une piste peut être plus prometteuse, comme le montre l'utilisation observée lors des SCE des rabattements critiques forcés, qui ne peut cependant être menée ici faute de cette information dans la base UDRIVE.

### Synthèse

La base UDRIVE est une base riche et écologique pour étudier les comportements des conducteurs lors de la réalisation d'une manœuvre donnée, ici celle du rabattement. Elle fournit une grande quantité de situations de conduite qui couvre des situations fluides et confortables, des situations plus tendues et, même si moins nombreuses, des situations critiques.

Les études menées dans le projet sont parties des 14 situations critiques de rabattement identifiées dans la base. Elles ont permis de mettre en avant des facteurs de sécurité et tout particulièrement 1) l'anticipation de l'adaptation de la trajectoire pour éviter l'impact lors des « rabattements forcés », très courts, 2) le maintien de la perception de la situation environnante lors de la gestion de l'insertion devant, et notamment en cas de « masquage d'un ralentissement » devant, qui peut se propager très vite avec des marges de sécurité réduites par la manœuvre.

A partir de ces résultats, qualitatifs, une généralisation et une quantification ont pu être menées grâce à la détection et à la sélection automatique de 24 676 situations avec un rabattement entre le véhicule considéré (assimilé au futur VA) et le véhicule tiers qu'il suivait. Une première étape a permis de caractériser la criticité des dépassements. C'est l'application d'une mesure du temps avant impact (TTC), généralisée pour anticiper la présence dans notre voie d'un véhicule en train de s'y insérer, qui a finalement permis de classer les situations de rabattements étudiées. Sans être aussi critique que les quasi-accident étudiés dans la première phase, la présence d'un  $TTC < 5$  sec à un moment donné de la manœuvre a permis d'identifier 1878 rabattements « agressifs », soit 7,6% des rabattements retenus. La comparaison de ces rabattements agressifs avec les rabattements nominaux a ensuite permis de caractériser leurs conditions d'apparition, montrant notamment une proportion plus importante quand le TIV avec le véhicule suivi est plus faible et lors d'un trafic dense. L'étude du comportement pendant la manœuvre a ensuite permis de montrer une diversité de situations, avec une plus forte proportion de freinages à la fois en amont du rabattement (avant T2), correspondant à la configuration de « rabattement forcé », mais aussi en fin de manœuvre, correspondant à la configuration « masquage ». L'étude de la communication par le conducteur lors de ces manœuvres a montré une proportion plus importante d'appels de phare, mais avec un nombre d'occurrence restant faible. Faute des données dans la base, cette analyse n'a pu être faite sur l'utilisation de l'avertisseur sonore.

Lors des études réalisées, un certain nombre de facteurs et de comportements sécuritaires des conducteurs ont été identifiés comme favorisant ou réduisant le risque lié aux rabattements :

- **Prévenir les rabattements agressifs** : L'augmentation du TIV, notamment au-dessus de 3 sec, a été montré comme corrélé à une proportion plus faible de rabattement agressifs subis. Augmenter le TIV semble alors un moyen de limiter l'exposition à des manœuvres potentiellement risquées.
- **Anticiper la réaction aux rabattements forcés** : Les rabattements très courts ont été gérés par les conducteurs par une détection très précoce et un freinage réalisé majoritairement avant que le véhicule s'insérant de franchisse la ligne. Dès la détection du début de la manœuvre,

notamment par l'inflexion de trajectoire, et avant même que le véhicule ne soit dans leur voie, les conducteurs anticipent sa position une fois sa manœuvre terminée. Ils initient la reconstitution de l'espace devant eux sans attendre de se retrouver avec des TIV et TTC effectifs critiques.

- **Se signaler en cas de rabattements amenant à l'impact** : les 2 derniers rabattements critiques forcés auraient mené à un impact sans une manœuvre d'évitement (sur la BAU) ou le signalement par un coup d'avertisseur sonore. Ce type de configuration est a priori lié à un défaut de contrôle ou d'attention. Un signalement sonore peut être ici un moyen d'attirer l'attention du conducteur s'insérant pour lui donner une chance d'annuler sa manœuvre.
- **Maintenir l'anticipation du trafic environnement malgré le masquage d'un rabatement** : Les 5 derniers cas critiques de rabatement montrent comment l'irruption d'un véhicule peut amener à masquer la vue et à focaliser l'attention du conducteur au détriment de l'anticipation d'un trafic éventuellement changeant autour. Rétablir les marges de sécurité uniquement avec le véhicule venant de s'insérer peut négliger le fait que ses propres marges de sécurité ont peut-être été compromises lors de l'insertion. Ce véhicule, juste devant, peut ainsi être amené à des freinages notablement plus forts et rapides. Un rétablissement accru de la marge de sécurité peut alors venir pallier ce risque.

Ces facteurs sont développés sous forme de recommandations dans la conclusion de ce livrable.

## Analyse des situations observées lors d'accidents

### Etudes Détaillées d'Accident (EDA)

La prévention des accidents s'appuie classiquement sur l'exploitation des fichiers issus des procès-verbaux. Cependant, ces données ne permettent pas de répondre à toutes les interrogations concernant la survenue des accidents de la circulation, et dans certains cas, il est nécessaire de faire intervenir des équipes techniques pluridisciplinaires sur la scène même de l'accident pour enquêter sur ses causes exactes.

L'objectif des EDA est le développement de la connaissance sur les mécanismes générateurs des accidents, et sur les processus de dysfonctionnement du système routier. Pour ce faire, les EDA prennent l'accident comme objet de recherche : il s'agit, à partir d'un recueil de données de qualité, de reconstruire et décrire le déroulement de l'accident, d'explicitier les enchaînements de causalité qui rendent compte de ce déroulement, et d'identifier parmi les caractéristiques des usagers, des véhicules et des infrastructures, les facteurs dont le contrôle permettra des actions de prévention et/ou de protection.

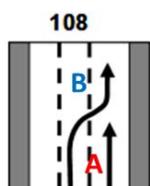
La stratégie des EDA repose sur le recueil du maximum de données centrées sur le déroulement de l'accident, sur la scène même de l'accident, par une équipe pluridisciplinaire, intervenant en temps réel, sur appel du SDIS. Ce premier recueil porte sur les trois composants : le conducteur (par entretiens), le véhicule et l'infrastructure (recueil sur l'infrastructure afin de réaliser un plan à l'échelle, photographies de la scène de l'accident et mesures des déformations sur les véhicules). Une première reconstruction oriente la seconde étape du recueil, qui porte sur l'itinéraire, les caractéristiques de la route, le contrôle technique du véhicule, et une série de variables susceptibles d'expliquer le rôle du conducteur dans le déroulement de l'accident. Des informations sur les lésions et les dommages corporels sont collectées.

La zone de collecte des EDA présentées dans ce rapport se situe dans le département d'Essonne en Ile de France.

### *Les critères de sélection et les variables étudiées.*

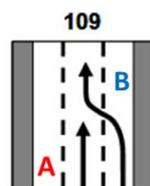
Dans la base de données EDA-LAB de 2005 à 2019 (757 accidents), les accidents impliquant un véhicule léger (VL) contre un autre véhicule léger ou un véhicule utilitaire léger (VUL) ont été sélectionnés puis ils ont été regroupés en fonction des configurations d'accident (pictogrammes).

Dans ce chapitre trois accidents associés aux pictogrammes 108 et 109 seront illustrés.



Un véhicule change de voie (ou se rabat) vers la droite et se fait percuter à l'arrière par un véhicule circulant sur cette voie.

(A – Véhicule supposé automatisé B – VL/VUL)



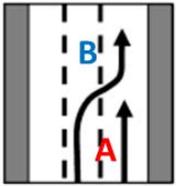
Un véhicule change de voie (ou se rabat) vers la gauche et se fait percuter à l'arrière par un véhicule circulant sur cette voie

(A – Véhicule supposé automatisé B – VL/VUL)

Chaque accident sera décrit avec les variables suivantes (à définir chaque variable) :

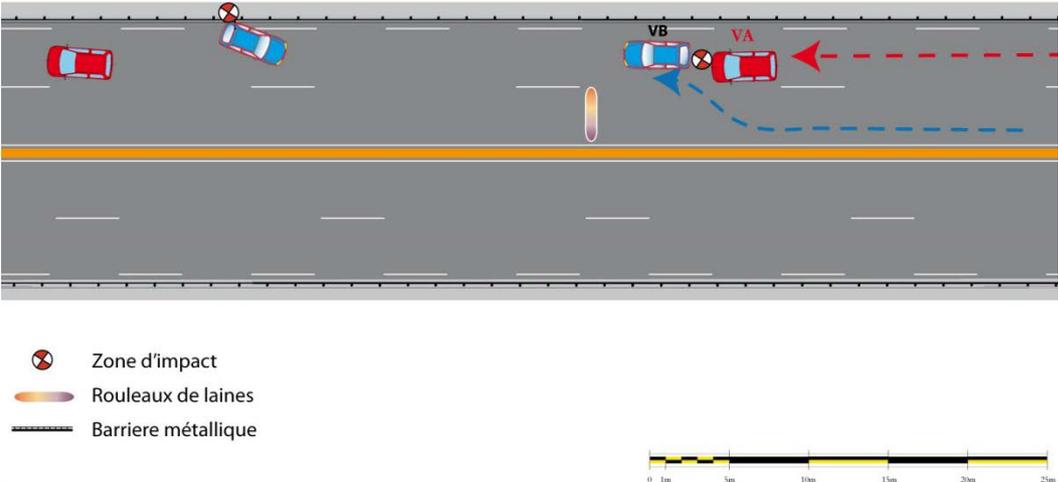
- Circonstances de l'accident : un résumé succinct de l'accident

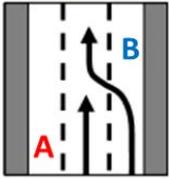
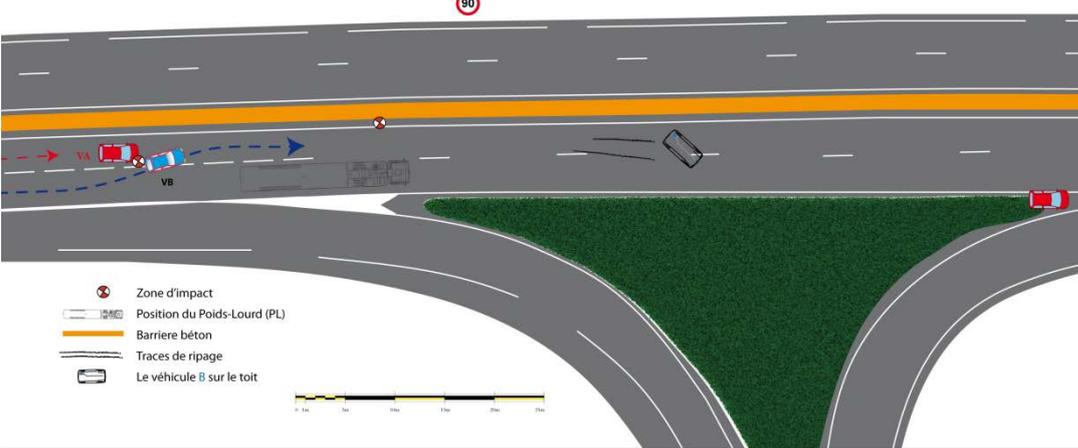
- Plan : illustration de l'infrastructure en 2D à l'échelle
- Conditions météorologiques : luminosité, conditions de luminosité particulières, conditions atmosphériques, précipitation, vent
- Type de route : autoroute, route nationale, route départementale, chemin communal ou route non spécifiée revêtue
- Caractéristique de la chaussée : état de la chaussée, condition de la chaussée, dégradation / déformation de la chaussée, état de la surface
- Sexe et âge des impliqués
- Gravité : indemne, blessé léger, blessé grave, tué
- Défaillance fonctionnelle du conducteur : fonction défaillante du processus humain de réalisation d'une tâche ou de traitement de l'information.<sup>2</sup>
- Eléments explicatifs : paramètres qui ont contribué à l'émergence de la défaillance fonctionnelle face à la situation routière à gérer (état de santé de l'utilisateur, état de la route, éblouissement par le soleil,...)<sup>3</sup>
- Vitesse d'impact est la vitesse du véhicule impliqué dans un accident immédiatement avant le choc.

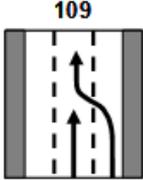
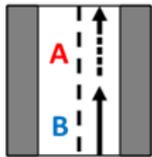
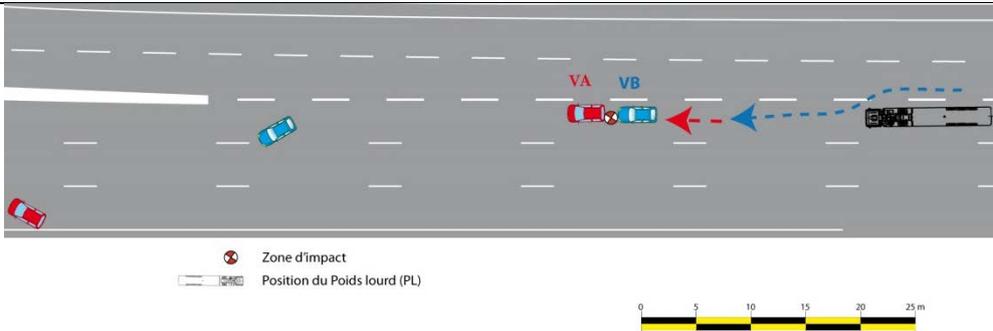
<p>108</p> 	<p><b>Un véhicule change de voie (ou se rabat) vers la droite et se fait percuter à l'arrière par un véhicule circulant sur cette voie.</b></p> <p><b>A – Véhicule supposé automatisé B – VL/VUL</b></p>
<p>Circonstances de l'accident</p>	<p>B circule sur la voie de gauche. A circule quelques mètres derrière B sur la voie à droite. Le conducteur B voit des rouleaux de laines de verre tombés d'un camion dans sa voie de circulation. Il contrôle sur son rétroviseur de droite et voit A arriver. Il pense avoir le temps de se rabattre sur la voie de droite pour éviter de percuter les rouleaux de laine de verre. Il se fait percuter à l'arrière par le véhicule A qui circulait dans sa voie de circulation. Le conducteur B perd le contrôle de sa voiture, percute ensuite la barrière métallique et se retrouve en tête-à-queue sur la voie de droite. A s'arrête à moins de 4 mètres du B.</p>

<sup>2</sup> Van Elslande, P et al. D 5.1 - Analyzing 'human functional failures' in road accidents, TRACE Report, 2007

<sup>3</sup> Naing, C et al. D 5.2 - Which Factors and Situations for Human Function Failures? Developing Grids for Accident Causation Analysis, TRACE Report, 2007

<p>Plan</p>	 <p>  Zone d'impact   Rouleaux de laines   Barrière métallique         </p>
<p>Conditions météorologiques</p>	<p>Clair, normal, jour</p>
<p>Type de route</p>	<p>Route nationale, vitesse maximale autorisée est de 90 km/h</p>
<p>Caractéristique de la chaussée</p>	<p>Pas de dégradation, bonne, pas de déformation, chaussée sèche</p>
<p>Impliqués</p>	<p>Conducteur A : Femme, 50 ans, indemne                  Conducteur B : Homme, 30 ans, blessé léger</p>
<p>Défaillance fonctionnelle</p>	<p>Conducteur A : pronostic; attente par défaut d'absence de manœuvre de la part d'autrui                  Conducteur B : décision ; violation contrainte</p>
<p>Éléments explicatifs</p>	<p>Conducteur A : faible niveau d'attention                  Conducteur B : pression situationnelle induisant une manœuvre précipitée</p>
<p>Vitesse d'impact</p>	<p>Vitesse A : 93 km/h                  Vitesse B : 54 km/h</p>

<p style="text-align: center;"><b>109</b></p> 	<p><b>Un véhicule change de voie (ou se rabat) vers la gauche et se fait percuter à l’arrière par un véhicule circulant sur cette voie.</b></p> <p><b>A – Véhicule supposé automatisé B – VL/VUL</b></p>
<p>Circonstances de l’accident</p>	<p>Le véhicule A circule sur la voie de gauche. Le véhicule B circule sur la voie de droite devant le véhicule A. Un PL se trouve devant le B, le conducteur décide de la dépasser, il change de file vers la gauche et se fait percuter à l’arrière par le véhicule A.</p>
<p>Plan</p>	
<p>Conditions météorologiques</p>	<p>Clair/normal, jour</p>
<p>Type de route</p>	<p>Départementale, 90 km/h</p>
<p>Caractéristique de la chaussée</p>	<p>Pas de dégradation, bonne, pas de déformation, chaussée sèche</p>
<p>Impliqués</p>	<p>Conducteur <b>A</b> : Homme, 68 ans, indemne                  Conducteur <b>B</b> : Homme, 27 ans, blessé léger</p>
<p>Défaillance fonctionnelle</p>	<p>Conducteur <b>A</b> : décision ; violation délibérée                  Conducteur <b>B</b> : décision ; violation intentionnelle d'une règle de sécurité</p>
<p>Éléments explicatifs</p>	<p>Conducteur <b>A</b> : impatience énervement                  Conducteur <b>B</b> : faible niveau d'attention - Banalisation de la situation</p>
<p>Vitesse d’impact</p>	<p>Vitesse <b>A</b> 86 km/h                  Vitesse <b>B</b> 76 km/h</p>

	<p><b>105</b></p>  <p><b>Un véhicule heurte l'arrière du véhicule précédent qui ralentissait.</b></p> <p><b>A – Véhicule supposé automatisé B – VL/VUL</b></p>
<p>Circonstances de l'accident</p>	<p>Le véhicule A circule sur une section courante, sur la voie de droite. Le véhicule B circule sur la bretelle. Il entame un dépassement d'un poids lourd (PL) par la gauche le PL se trouvant sur la même voie de circulation que le véhicule A. Ensuite il s'insère devant le PL - une première situation accidentelle de type 109. Inattentif, il ne voit pas le ralentissement de A. Les deux véhicules se percutent. Conducteur B affirme qu'il était concentré sur sa manœuvre de déboisement vers la gauche. Il n'a pas vu que le véhicule devant lui qui freinait (fort ralentissement).</p>
<p>Plan</p>	 <p>Sections courantes Bretelles</p> <p>Zone d'impact Position du Poids lourd (PL)</p> <p>0 5 10 15 20 25 m</p>
<p>Conditions météorologiques</p>	<p>Clair/normal, jour</p>
<p>Type de route</p>	<p>Route nationale, Vitesse maximale autorisée est de 90 km/h</p>
<p>Caractéristique de la chaussée</p>	<p>Pas de dégradation, bonne, pas de déformation, chaussée sèche</p>
<p>Impliqués</p>	<p>Conducteur A : Homme, 25 ans, indemne Conducteur B : Homme, 30 ans, blessé léger</p>
<p>Défaillance fonctionnelle</p>	<p>Conducteur A : Aucune défaillance fonctionnelle Conducteur B : saisie ; saisie d'information focalisée</p>
<p>Eléments explicatifs</p>	<p>Conducteur A : conducteur passif, pas d'éléments explicatifs Conducteur B : Impatience - Contrainte de temps situationnelle (affectée à la manœuvre) - Difficulté d'obtention d'un créneau de traversée ou d'insertion (densité, vitesse du trafic)</p>
<p>Vitesse d'impact</p>	<p>Vitesse A : 70 km/h Vitesse B : 86 km/h</p>

## V- Manœuvres d'arrêt (décélérations)

### Analyse des situations observées en situation naturelle

#### Objectifs de l'étude

L'un des objectifs du projet SURCA est d'identifier les conditions qui permettront aux véhicules automatisés (VA) de faire aussi bien que les conducteurs dans les conditions de conduite normales, et surtout, mieux qu'eux dans les situations accidentogènes.

Dans ce contexte, la littérature et le retour d'expérience international sur les accidents impliquant des VA ont permis d'identifier les accidents de type collision par l'arrière lors de manœuvres de freinage du VA comme prépondérants (Biever et al., 2020; Favarò et al., 2017; S. Wang & Li, 2019). La difficulté d'anticipation par les conducteurs humains de la manœuvre de ralentissement du VA est l'une des hypothèses avancées au regard des analyses de ces accidents (Biever et al., 2020). En effet, les VA sont conçus pour optimiser le déplacement selon plusieurs critères tels que l'anticipation des dangers au travers d'une conduite de type défensive (Pokorny et al., 2021) ou encore l'optimisation de la consommation énergétique (Meng & Cassandras, 2018) qui peuvent conduire à des comportements différents des humains.

Les recherches antérieures sur les comportements de décélération se sont le plus souvent intéressées à la modélisation des profils de vitesse ou de décélération le long d'une infrastructure particulière telle qu'une sortie d'autoroute (Bennett & Dunn, 1995) ou en amont de plusieurs intersections toutes régulées par un panneau stop (J. Wang et al., 2005). A partir de données recueillies sur différentes infrastructures, Akçelik & Biggs (1987) ont mis en évidence que le modèle polynomial est le modèle le plus adapté pour représenter des profils de décélération. Cependant, ils n'ont pas étudié l'existence d'un effet de l'infrastructure sur les profils de décélération. A notre connaissance, le travail de Deligianni et collaborateurs (2017) est le seul à avoir suggéré que les comportements de décélération telle que la décélération maximale ou la durée de la décélération pouvaient être influencée par la raison de l'arrêt en distinguant les raisons dynamiques tel qu'un piéton versus les raisons statiques tel qu'une intersection. Leur étude ne tient pas compte de l'influence du régime de priorité des intersections.

L'idée de cette étude est de chercher à comprendre comment les décélérations pratiquées par les humains sont influencées par certaines caractéristiques du contexte routier. En effet, nous faisons l'hypothèse que les profils de décélérations des véhicules légers précédents un arrêt, diffèrent en fonction de la raison de l'arrêt liée au type d'intersection ou d'aménagement (signal tricolore, stop, cédez-le-passage, carrefour giratoire, passage piéton, arrêt de bus).

La méthode choisie a consisté à rechercher tous les événements associés à une décélération complète (i.e. menant à un arrêt du véhicule) dans plusieurs bases de données de conduite en situation naturelle obtenues dans le cadre de précédentes expérimentations. Ainsi, plus de 2500 profils de vitesses ont été analysés et décrits selon l'infrastructure ayant le plus probablement causée l'arrêt. Ensuite, une modélisation polynomiale est proposée : les profils de décélérations (la vitesse en fonction du temps avant l'arrêt total) sont décrits comme des polynômes d'ordre 2 (Akçelik, R., & Besley, M. (2001)), dont les paramètres seront estimés grâce aux données réelles (cf. ci-dessous). L'évolution de ces paramètres selon la variable d'intérêt, l'infrastructure ayant causé l'arrêt, sera discutée compte tenu de la vitesse autorisée. Enfin, des enseignements seront tirés du point de vue des VA.

## Matériel et méthodes

### *Données de conduite*

Les données utilisées dans ce travail sont issues de cinq expériences différentes menées entre 2009 et 2019 par l’Université Gustave Eiffel (anciennement Ifsttar) ou le Cerema. Bien que destinées à étudier des situations de conduite particulières (éco-conduite, comportements aux intersections, position latérale), ces expérimentations ont en commun un protocole fondé sur l’observation de la conduite en situation naturelle. Les données ainsi recueillies représentent un comportement de conduite non influencé par un système d’assistance ou de consignes particulières ayant pu influencer les manœuvres d’arrêts des participants, ces derniers ayant tous reçu la consigne de conduire en toute sécurité en étant maîtres et responsables de leur véhicule sur des parcours prédéterminés dans et aux alentours des villes de Versailles (coordonnées GPS) et de Saint-Brieuc (Côtes d’Armor, coordonnées GPS).

L’enregistrement des paramètres de la conduite automobile a bénéficié d’une approche technique très comparable lors de ces expériences ce qui permettait de disposer des données de conduite homogènes utiles à l’identification des séquences de données de décélération puis à l’analyse des profils de vitesse en fonction du temps ou de la distance. En effet, pour chaque expérience, nous avons pu extraire les données horodatées issues du BUS CAN ou du récepteur GPS. Nous disposons donc de l’ensemble des données brutes suivantes à une fréquence de 10 Hz :

- Horodatage (GPS)
- Vitesse instantanée (Bus CAN)
- Distance cumulée parcourue (Bus CAN)
- Longitude (GPS)
- Latitude (GPS)
- Accélération (Accéléromètre).

Ces données de conduite brutes et calculées ont été utilisées pour identifier les séquences de données contenant une manœuvre d’arrêt puis pour identifier et décrire les séquences de décélération.

**Tableau 8 : Informations sur les expériences dont les données utiles à cette étude ont été extraites.**

Nom de l’expérience	Nombre de participants	Longueur (km)	Zone géographique	Période de recueil des données
Eco-Driver	30	25	Versailles (78)	18/2/2014 au 24/7/2014
Eco-Conduite	61	16.5	Versailles (78)	2009
I2V Intersection	34	70	Saint-Brieuc (22)	03/10/2012 au 16/11/2012
PROFIL	20	75	Saint-Brieuc (22)	07/11/2016 au 16/12/2016
PROFIL 2018	21	16	Saint-Brieuc (22)	05/06/2019 au 19/09/2019

### *Données de description de l’environnement de conduite*

Dans les deux expériences portant sur l’éco-conduite (Eco-Driver et Eco-conduite), la position de la signalisation verticale ou horizontale et de certains aménagements d’intérêts pour contextualiser l’activité de conduite en termes de raison d’arrêt ou de vitesse maximale autorisée avait été enregistrée lors de l’acquisition initiale des données.

Pour les trois autres expériences (I2V Intersection, PROFIL, PROFIL2018), des cartographies des types d’intersections ou d’aménagements d’intérêts ainsi que des vitesses maximales autorisées ont été réalisées spécifiquement pour cette étude en prenant soin de valider la cohérence du relevé cartographique en le croisant avec les données vidéos recueillies à l’époque.

Le géo-référencement de ces différents types d’intersection ou d’aménagement ainsi que des vitesses maximales autorisées ont été utilisés pour contextualiser les manœuvres d’arrêt identifiées.

Pour l'ensemble des expériences, huit types d'infrastructures susceptibles de générer un arrêt du véhicule ont été envisagés initialement. Ces infrastructures se répartissaient en quatre types d'intersections et quatre aménagements en section courante. Les quatre types d'intersection d'intérêts retenus étaient les carrefours en croix ou en T régulés par un signal tricolore (FT), un panneau stop (ST), un panneau « Cédez le passage » (CP) et les carrefours giratoires (RP). Les quatre types d'aménagements d'intérêts retenus étaient le passage piéton hors intersection (PP), l'arrêt de bus (AB), la surélévation de chaussée avec passage piéton (PG) et la surélévation de chaussées sans passage piéton (GC). Certaines de ces situations n'ont pas été retenues après l'analyse descriptive. Par exemple, les surélévations de chaussées sans passages piétons ne sont pas susceptibles de déclencher un arrêt du véhicule.

Enfin, pour l'ensemble des expériences, les sept vitesses maximales autorisées en vigueur sur les parcours (20, 30, 40, 50, 70, 90, 110 km/h) ont initialement été envisagées.

Nous verrons plus loin que les analyses menées sont restreintes à certaines combinaisons d'infrastructures et de vitesses limites autorisées (VMA).

#### *Méthodologie et étapes de traitement des données*

La chaîne de traitement utilisée pour mener notre étude est décrite étape par étape au Tableau 9. Plusieurs étapes de préparation des données ont été réalisées pour constituer l'échantillon de séquences de données de décélération analysées à partir des données de conduite et des données décrivant la localisation des infrastructures ou aménagements susceptibles de provoquer une manœuvre d'arrêt.

**Tableau 9 : Description des étapes de la chaîne de traitement des données utilisée dans le cadre de cette étude.**

Etape du traitement des données	Description
<b>Etape 0 : Importation et pré-traitement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unification des noms de variables.</li> <li>• Harmonisation des représentations et des unités.</li> <li>• Lissage de l'accélération (Moyenne mobile sur 2 secondes).</li> </ul>
<b>Etape 1 : Extraction des décélérations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identification des périodes d'arrêt du véhicule (vitesse instantanée &lt; 5km/h).</li> <li>• Identification des arrêts (période d'arrêt supérieure à 3 secondes).</li> <li>• Extraction des 20 secondes précédant le premier instant d'un arrêt.</li> </ul>
<b>Etape 2 : pré-traitement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalisation des variables (temps allant de -20 sec à 0, distance parcourue démarrant à 0).</li> <li>• Création de variables indicatrices</li> </ul>
<b>Etape 3 : Filtrage I.1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtre grossier, éliminant les erreurs de capteurs (par exemple, un temps ou une distance qui décroissent).</li> </ul>
<b>Etape 4 : Filtrage I.2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suppression des profils de vitesse pour lesquels le nombre de points avec une vitesse &lt;30 km/h pendant plus de 70% du temps (soit + de 14 secondes pour des profils de 20 secondes).</li> </ul>
<b>Etape 5 : Filtrage I.3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suppression des profils de vitesse « plats », cad avec un nombre de points avec accélération=0 pendant plus de 50% du temps. Ce phénomène traduit en général la présence de données manquantes ayant été interpolées linéairement.</li> </ul>

Etape du traitement des données	Description
<b>Etape 6 : Ajout de l'infrastructure ayant causée l'arrêt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Importation des données de l'infrastructure présente le long du trajet effectué.</li> <li>• Pour chaque arrêt (dernier point du profil de vitesse extrait à l'étape 1) on identifie les raisons potentielles, cad les infrastructure présentes dans les 20 mètres suivant le premier instant d'un arrêt, ainsi que la VMA en vigueur.</li> <li>• Application de la règle de décision pour décider quelle est la cause la plus probable.</li> <li>• Ajout de cette information aux données.</li> </ul>
<b>Etape 7 : Interpolation en temps</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interpolation/rééchantillonnage des profils pour avoir un 5 points par seconde.</li> <li>• Ajout de variables lissées (notamment un nouveau lissage spline sur l'accélération déjà lissée par MM2 à l'étape 0).</li> </ul>
<b>Etape 8 : Découpage des décélérations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• On extrait des 20 secondes de décélération, la partie qui correspond à la phase finale : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Détermination du premier point pour lequel l'accélération est négative (i.e. à partir de <math>t=-20</math> secondes, on cherche le premier passage par 0 de l'accélération lissée calculée à l'étape 7).</li> <li>○ Extraction de la partie du profil de vitesse située après ce point.</li> </ul> </li> </ul>
<b>Etape 9 : Filtrage II.1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suppression des courbes de décélération qui ont des valeurs aberrantes pour l'accélération, i.e. avec <math>\text{abs}(\text{accélération}) &gt; 5\text{ms}^{-2}</math>.</li> </ul>
<b>Etape 10 : Filtrage II.2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suppression des décélérations qui ont des variations de vitesses trop importantes (i.e. <math>\text{max}(\text{accélération}) - \text{min}(\text{accélération}) &gt; 3.5\text{ms}^{-2}</math>). Cela permet d'identifier et d'écarter des décélérations avec de fortes variations de vitesses, cad des décélérations non-homogènes et probablement en situation de trafic contraint.</li> <li>• Suppression des profils de vitesse qui ont un passage à vitesse très faible (<math>&lt;5\text{km/h}</math>) pendant la phase d'approche de la décélération (définie comme les 90% premiers instants, soit 18 secondes pour un profil de 20 secondes). Cela permet d'identifier des probables situations de congestion.</li> <li>• Suppression des profils de décélération avec une vitesse finale aberrante (cad, soit <math>&lt;0\text{km/h}</math>, soit <math>&gt;5\text{km/h}</math>). Ce type de situation correspond à des erreurs d'interpolation, parfois dû à des effets de bords, ou à des données manquantes.</li> </ul>
<b>Etape A-11 : Calcul des indicateurs agrégés</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conversion des profils de décélération tronqués (i.e. de durées différentes après la sélection à l'étape 8).</li> <li>• Calcul des indicateurs analysés dans la section suivante : Durée de la décélération (en secondes), Distance de décélération (en mètres), Vitesse initiale (km/h), Décélération moyenne (m/s<sup>2</sup>), Décélération maximale (m/s<sup>2</sup>).</li> </ul>

Etape du traitement des données	Description
<b>Etape A-12 : Analyse des caractéristiques des décélérations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Sélection des infrastructures et des vitesses limites (VMA) retenues pour l'analyse.</b></li> <li>• <b>Analyse de variance sur les indicateurs obtenus à l'étape précédente.</b></li> </ul>
<b>Etape B-11 : Extension des profils de décélération sélectionnés sur 200m.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chaque profil de décélération sélectionné à l'étape précédente est à nouveau extrait des données pour récupérer les 200 dernier mètres.</li> </ul>
<b>Etape B-12 : Filtre III</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• On réapplique le filtre de l'étape 4 (filtre I.2) car sur une distance de 200 mètres il peut y avoir des passages avec <math>v &lt; 5 \text{ km/h}</math> que l'on n'aurait pas détectés à l'étape 4 (décélérations de 20 secondes).</li> </ul>
<b>Etape B-13 : Interpolation en distance</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• On interpole à nouveau les profils de décélération pour avoir 1 point par mètre pour chacun d'eux.</li> </ul>
<b>Etape B-14 : Modélisation des profils de décélération</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Régression polynomiale sur les courbes de décélération.</b></li> </ul>

Une première étape visait à extraire les séquences de données de conduite en amont d'un arrêt (étape 1). Dans cette étude, l'arrêt a été défini comme l'occurrence d'une vitesse inférieure à 5 km/h pendant une durée d'au moins 3 secondes. Pour chaque arrêt détecté, nous avons récupéré les données de conduite et de localisation horodatées enregistrées durant les 20 secondes précédant le début de l'arrêt. La série temporelle de données obtenue constitue une « **séquence de données précédant un arrêt** » contenant le temps, la position (latitude, longitude), la vitesse instantanée (mesurée par le BUS Can ou le récepteur GPS) et la distance parcourue cumulée à une fréquence de 10 Hz. Après normalisation des variables temps et distance, ces séquences de données nous ont permis de réaliser des profils de vitesse en fonction du temps ou de la distance en amont des arrêts (étape 2).

Ensuite, ces séquences de données précédant un arrêt ont été filtrées (étapes 3 à 5) afin d'écarter les séquences contenant des erreurs de mesure liées aux capteurs ainsi que les séquences dont les données laissent penser que la manœuvre d'arrêt n'est pas en lien avec les raisons de l'arrêt. Par exemple, afin d'exclure les séquences de données liées à des situations de congestion, les séquences de données présentant une forte proportion de vitesse inférieure à 30 km/h ont été exclues (étape 4 du Tableau 9). Ce processus de filtrage est illustré à la Figure 32.

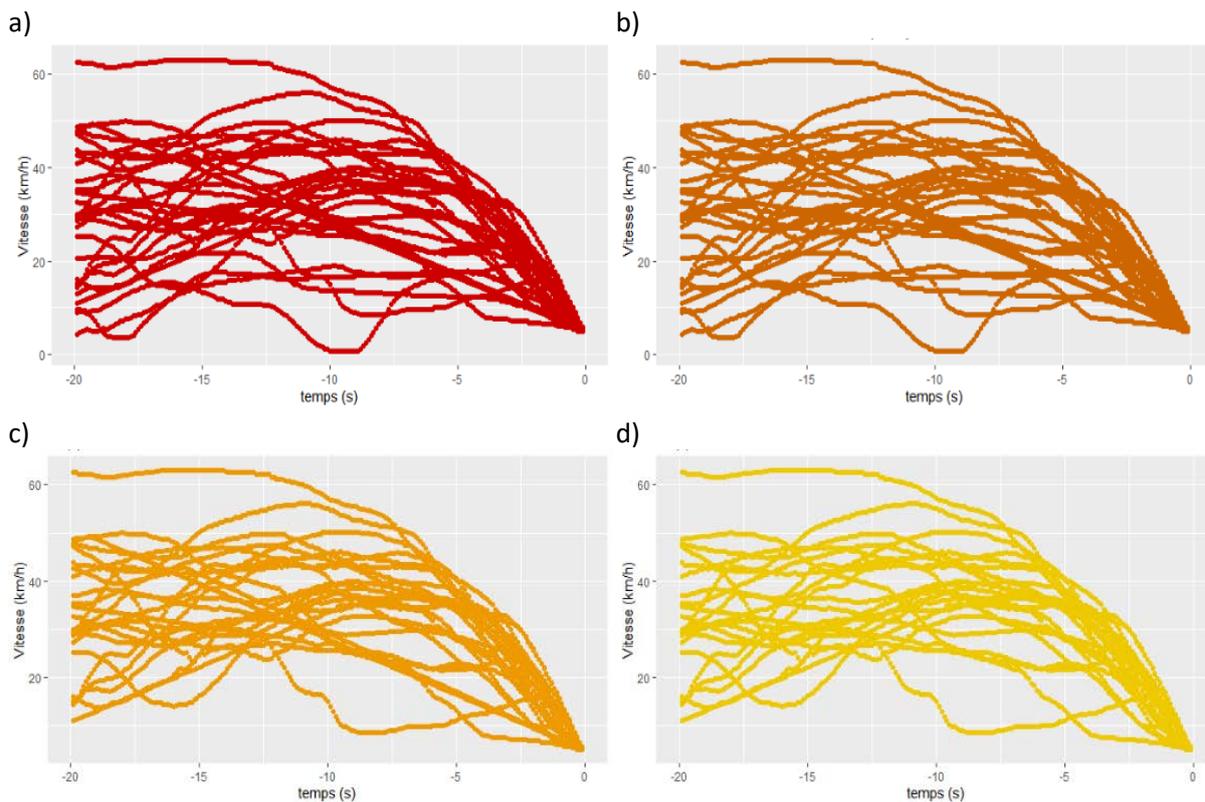


Figure 32 : Illustration du travail d'extraction et de filtrage des séquences de données de 20 s précédant le début d'un arrêt

Les séquences de données précédant un arrêt retenu après les étapes précédentes ont ensuite été enrichies avec les éléments de contexte d'intérêts (étape 6), à savoir la raison de l'arrêt et la vitesse maximale autorisée (VMA).

Si l'association de la VMA était aisée à réaliser à partir des données de localisation du point d'arrêt et des données cartographiques, l'identification de la raison en lien avec l'infrastructure routière ayant causé la manœuvre d'arrêt nécessite un traitement spécial. En effet, les expériences n'ont pas permis l'enregistrement systématique de vidéos. De ce fait, la raison de l'arrêt devait être inférée à partir du croisement de la localisation du point d'arrêt et de la cartographie des infrastructures routières susceptibles d'être à l'origine de la manœuvre d'arrêt détectée.

Le processus a consisté, pour chaque séquence de données, à identifier l'ensemble des raisons d'arrêts d'intérêts présentes dans les 20 m autour du point d'arrêt en tenant compte du sens de circulation du véhicule. Ainsi pour chaque séquence de décélération, nous pouvons associer la dernière position avec aucune, une seule ou plusieurs raisons ayant pu induire cet arrêt. Si aucune raison n'est identifiée, alors la raison de l'arrêt est considérée comme inconnue (modalité NA, pour « non available »). Si une seule infrastructure est détectée, elle est conservée. Enfin si plusieurs raisons sont possibles, une règle de décision en cinq niveaux visant à identifier la raison d'arrêt la plus probable parmi celles identifiées a été appliquée (Figure 33). Les ordres de priorité au sein de la règle de décision sont les suivants :

1. **Priorité 1 : Signal tricolore** : Dès lors qu'un arrêt était observé à moins de 10 m d'un signal tricolore, nous avons considéré que la raison de l'arrêt était la présence d'un feu circulaire rouge sur le signal tricolore ;
2. **Priorité 2 : Carrefour non giratoire avec une signalisation de type « cédez le passage ou stop »** : en l'absence de signal tricolore et en présence d'un carrefour non giratoire présentant une

signalisation de type « cédez le passage » ou stop, nous avons considéré que la raison de l'arrêt la plus probable était liée à l'un ou l'autre de ces régimes de priorité ;

3. Priorité 3 : Carrefour giratoire : en l'absence de signal tricolore et en présence d'un carrefour giratoire, souvent accompagnés de passages piétons à proximité, nous avons considéré que la cause la plus probable de l'arrêt était liée à la présence de ce carrefour giratoire ;
4. Priorité 4 : Passage piéton seul ou sur une surélévation de chaussée : en l'absence des situations précédentes et en présence d'un passage piéton situé ou non sur une surélévation de chaussée, nous avons considéré que le passage piéton était la raison la plus probable de l'arrêt ;
5. Priorité 5 : Arrêt de bus ou surélévation de chaussée : en l'absence de toute autre raison et en présence d'un arrêt de bus ou d'une surélévation de chaussée, deux situations ne pouvant pas se produire concomitamment, nous avons considéré que cette infrastructure était la raison la plus probable de l'arrêt.

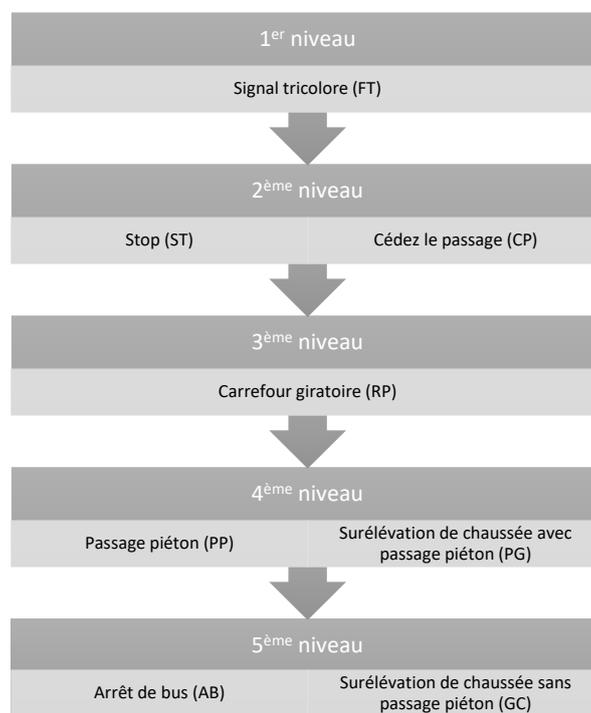
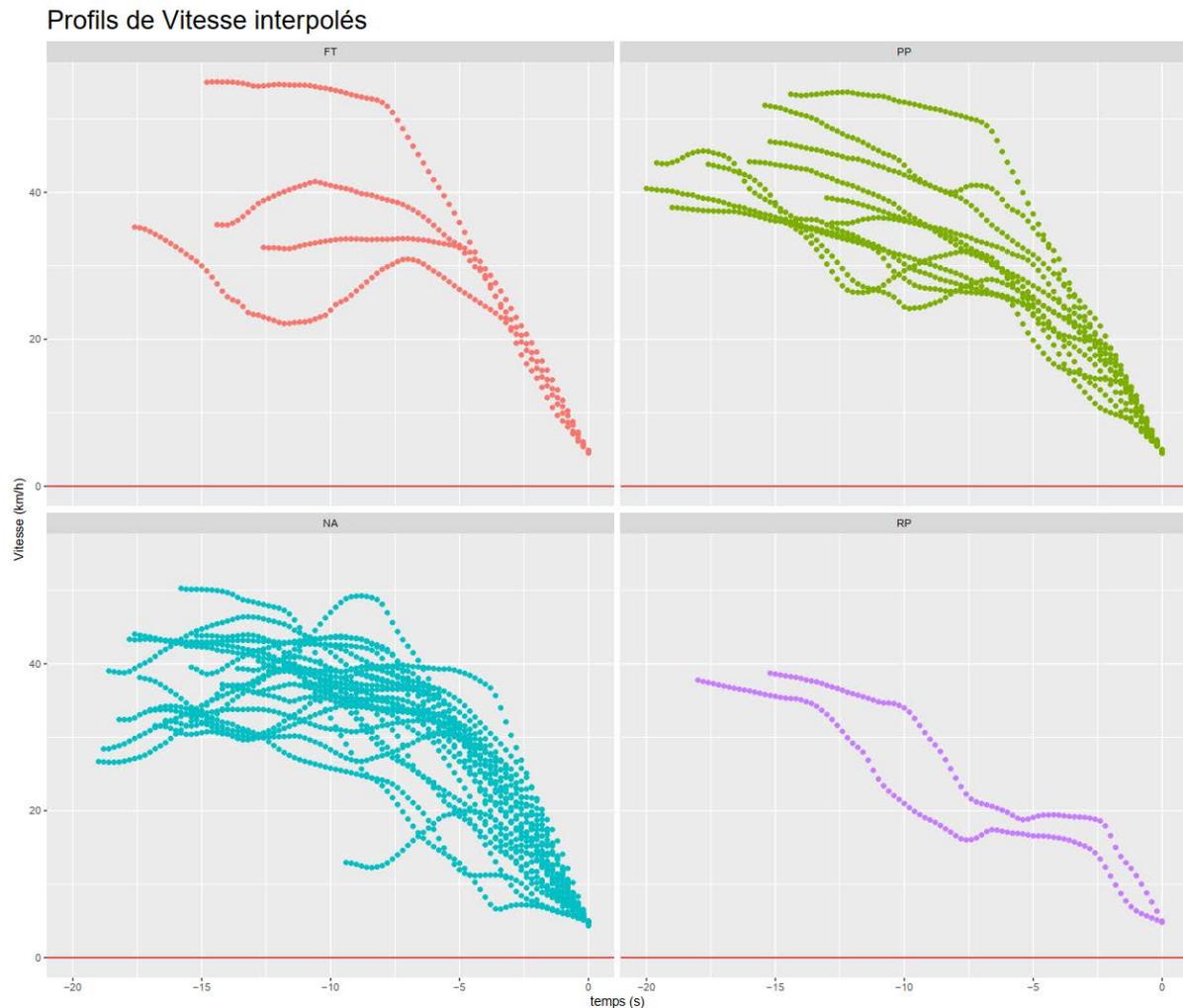


Figure 33 : Règle de décision appliquée pour identifier la raison de l'arrêt la plus probable.

Ces séquences de données de décélération ont ensuite été ré échantillonnées et interpolées à une fréquence de 5Hz. Puis nous avons filtré les données d'accélération à l'aide d'une moyenne glissante sur une fenêtre de 2 s, sur laquelle nous avons à nouveau appliqué un lissage spline afin d'obtenir un signal peu bruité. (Étape 7).

A ce stade du traitement des données, nous avons extrait des séquences de données non bruitées d'une durée de 20 s en amont d'un arrêt dont nous avons identifié la cause probable. Par contre, nous n'avons pas extrait la manœuvre de décélération proprement dite. Ainsi, nous devons rechercher le premier instant de décélération de chaque séquence, en vue d'extraire la séquence finale uniquement (étape 8). Pour cela, nous avons recherché le premier instant où les données d'accélération passent d'une valeur positive à une valeur négative. Le point ainsi trouvé représente le premier instant de la séquence de décélération proprement dite. L'ensemble des points suivants jusqu'à l'arrêt final sont ensuite extraits. Une fois ce découpage effectué, nous obtenons des séquences d'arrêt qui ne sont plus homogènes en temps ou en distance mais qui représentent les phases de décélération proprement

dite. Avant de décrire ces phases de décélération à l'aide d'indicateurs agrégés visant à caractériser le comportement de décélération, deux nouvelles étapes de filtrage (étapes 9 et 10) sont menées afin d'écartier des situations de conduites contraintes ou probablement associées à des congestions, ainsi que des erreurs de traitement. Après ce nouveau filtrage, nous obtenons des séquences de décélérations proprement dite dont un extrait est présenté à la Figure 34 sous la forme de profil de vitesse en fonction du temps.



**Figure 34 : Exemples de séquence de décélération proprement dites obtenues à l'issue de l'étape 10 pour différentes raisons d'arrêts : a) feu tricolore ; b) passage piéton ; c) raison d'arrêt non identifiée et d) carrefour giratoire.**

Enfin, pour chacune de ces séquences de décélération proprement dite, cinq indicateurs agrégés ont été calculés (étape A-11), à savoir :

- La durée de la décélération (en secondes) ;
- La distance de décélération (en mètres) ;
- La vitesse initiale (km/h) ;
- La décélération moyenne ( $m/s^2$ ) ;
- La décélération maximale ( $m/s^2$ ).

Ces indicateurs sont ensuite analysés (étape A-12), à l'aide de méthodes descriptives de type « analyse de la variance.

Cette première analyse sur des indicateurs agrégés (étapes A-11 à A-12) est complétée par une analyse fonctionnelle, c'est-à-dire dans notre cas, une modélisation polynomiale d'ordre 3 (étapes B-11 à B-

14). Cela implique de disposer de séquences de décélérations d'une longueur identique. Par conséquent, l'étape suivante (étape B-11) a consisté à reprendre les séquences identifiées à l'issue de l'étape 10, pour les prolonger jusqu'à une distance de 200 m en amont du point d'arrêt final. Cette valeur de 200 m a été déterminée à l'aide de l'analyse descriptive précédente en cherchant à disposer de phases finales de décélérations non tronquées pour la majorité des séquences (Quantile à 90% de la distance moyenne = 175m). Un dernier filtre (étape B-12) permet de tenir compte de la plus grande longueur des séquences de décélération en supprimant ceux qui contiennent un arrêt dans les 180 premiers mètres (i.e. 90% de la longueur totale).

In fine, après une opération d'interpolation en distance (étape B-13), nous sommes en mesure de modéliser les séquences de décélération (étape B-14) dont les résultats sont présentés plus loin.

#### *Analyse des données*

Suite aux étapes 0 à 10, de nombreuses séquences ont été identifiées puis triées. Le résultat des différents filtrages est présenté au Tableau 10. A l'issue de l'étape 10, 2677 séquences de décélération proprement dites ont été identifiées. Une première analyse a porté sur la répartition des séquences de profil de décélération entre les huit infrastructures d'arrêt (signal tricolore ; stop ; cédez le passage ; carrefour giratoire rond-point ; passage piéton ; passage piéton sur surélévation de chaussée, surélévation de chaussée, arrêt de bus) et entre les sept vitesses maximales autorisées (20, 30, 40, 50, 70, 90, 110 km/h). Celle-ci a fait apparaître que certaines raisons d'arrêts étaient sous-représentées (Tableau 11 et Tableau 12). Nous avons donc restreint notre analyse aux infrastructures signal tricolore (FT), stop (ST), cédez le passage (CP), passage piéton (PP), et NA qui représente l'absence de cause identifiée. Pour les VMA, nous avons conservé dans un premier temps les limitations 30 km/h, 50 km/h, 70 km/h, et 90 km/h.

Si l'on croise ces deux informations, après avoir filtré selon les choix effectués ci-dessus, nous obtenons le Tableau 13. La distribution des décélérations nous incite à prendre quelques précautions. En effet, certaines cellules contiennent trop peu de données pour atteindre une représentativité statistique satisfaisante. Ainsi nous faisons le choix de se protéger des mauvaises intuitions en n'analysant pas les cellules avec moins de 100 individus. Ainsi, la situation des carrefours giratoire n'est pas analysée.

Par ailleurs, les décélérations avec VMA=30km/h sont assez atypiques et hétérogènes. Il ne nous est pas apparu judicieux d'utiliser ces données, source potentielle de confusion dans l'interprétation des effets des feux tricolores.

De manière similaire, il semble hasardeux de chercher à interpréter l'effet de la présence d'un arrêt de bus dans l'environnement proche d'un arrêt avec seulement 75 observations. Ce d'autant que la constitution des données ne nous permet pas de garantir un lien de causalité entre la présence de l'arrêt de bus et la manœuvre d'arrêt.

In fine, nous restreignons l'analyse aux cellules indiquées en gras dans le Tableau 9, et créons une nouvelle variable fusionnée avec les modalités suivantes :

- Feu tricolore 50 : Arrêt à proximité immédiate d'un feu tricolore, avec VMA=50 km/h.
- Passage piéton 50 : Arrêt à proximité immédiate d'un passage piéton, avec VMA=50 km/h.
- Stop 50 : Arrêt à proximité immédiate d'un panneau Stop, avec VMA=50 km/h.
- Stop 90 : Arrêt à proximité immédiate d'un panneau Stop, avec VMA=90 km/h.
- Cédez-le-passage 90 : Arrêt à proximité immédiate d'un panneau Cédez-le-passage, avec VMA=90 km/h.

En effet, comme la mise en place des différents types d'aménagements se fait en lien avec les vitesses envisagées (de conception), il est apparu nécessaire d'intégrer l'effet de la Vitesse Maximale Autorisée

non pas comme une co-variable mais plutôt de définir une variable indépendante appelée *Raison de l'arrêt* avec cinq modalités combinant à la fois l'infrastructure d'arrêt et la vitesse maximale autorisée.

**Tableau 10 : Table de fréquence des séquences de décélérations obtenues à chaque étape du pré-traitement et selon chaque expérimentation.**

ID_Expérience	Décélérations initiales	Après tri I (étape 0-5)	Après tri II (étapes 6-10)	Après tri final (étapes B11-B14)
Eco_Conduite	3350	675	478	282
Eco_Driver	5867	1779	1245	768
Expe_01	1190	931	791	332
Expe_03	256	256	120	85
Expe_04	233	61	43	23
total	10896	3702	2677	1490

**Tableau 11 : Répartition des effectifs obtenus après le tri II, selon les différentes infrastructures considérées initialement.**

Cause Decel	Effectif	Pourcentage
FT	919	34.329
NA	855	31.939
ST	352	13.149
CP	224	8.368
PP	165	6.164
RP	78	2.914
AB	77	2.876
PI	6	0.224
PG	1	0.037

**Tableau 12 : Répartition des effectifs obtenus après le tri II, selon les différentes VMA.**

Vitesse limite	Effectif	Pourcentage
50	1786	66.891
90	543	20.337
70	195	7.303
30	137	5.131
40	6	0.225
110	2	0.075
20	1	0.037

**Tableau 13 : Fréquence des décélérations selon le croisement des variables "Raison de l'arrêt" et "vitesses limites". Les données retenues pour l'analyse sont indiquées en gras.**

Raison de l'arrêt	Speed Limit				Total
	30 km/h	50 km/h	70 km/h	90 km/h	
Bus Stop	1	75	0	1	77
Give Way	2	6	11	<b>205</b>	224
Traffic Light	64	<b>783</b>	70	0	917
NA	44	<b>554</b>	97	<b>155</b>	850
Pedestrian Crossing	6	<b>139</b>	11	7	163
Roundabout	3	65	6	4	78
Stop Sign	17	<b>162</b>	0	<b>171</b>	350
Total	137	1784	195	543	2659

Les séquences de décélérations réparties selon les cinq modalités de la variable *Raison de l'arrêt* ont ensuite été décrites selon les cinq indicateurs suivants :

- Durée de la décélération (en secondes)
- Distance de décélération (en mètres)
- Vitesse initiale (en km/h)
- Décélération moyenne (m/s<sup>2</sup>) : moyenne des valeurs de décélération pendant la décélération.
- Décélération maximale (m/s<sup>2</sup>) : valeur absolue maximale de la décélération

Des analyses de variance ont été réalisées pour ces 5 indicateurs.

Afin de compléter l'approche descriptive précédente, nous avons ensuite mené une analyse avec une approche fonctionnelle des profils des vitesses et de décélération, c'est-à-dire en tenant compte de leur évolution individuelle en fonction de la distance précédant l'arrêt. En premier lieu nous présentons une approche empirique descriptive à base de courbes moyennes. En seconde lieu, nous proposons une modélisation polynomiale différenciée selon la raison de l'arrêt.

Afin de pouvoir travailler sur des séquences de décélération comparables, il faut définir un seuil de distance commun à l'ensemble de ces séquences. L'ensemble des séquences de décélérations sélectionnées à la section précédente ont donc été à nouveau extraites des données mais en sélectionnant les points jusqu'à 200m avant l'arrêt. Cette valeur de 200 m permet, suite à l'analyse descriptive précédente, de disposer de phases finales de décélérations non tronquées pour la majorité des séquences (Quantile à 90% de la distance moyenne = 175).

## Résultats

### Analyse descriptive des caractéristiques des décélérations

Les moyennes et les écart-types des cinq indicateurs décrivant les profils de décélération proprement dites sont présentés au Tableau 10.

**Tableau 14 : Valeurs moyennes (m) et écart-type (sd) des cinq indicateurs calculés pour les séquences de décélération, selon la raison de l'arrêt.**

<i>Raison de l'arrêt</i>	Durée de la décélération		Distance de la décélération		Vitesse initiale		Maximum de la décélération		Décélération moyenne	
	m	sd	m	sd	m	sd	m	sd	m	sd
<i>Stop 50</i>	14.73	3.59	129.97	56.39	47.68	17.98	-2.08	0.41	-0.83	0.30
<i>Passage piéton 50</i>	13.97	3.87	103.27	38.67	38.40	5.69	-1.96	0.42	-0.72	0.25
<i>Feu tricolore 50</i>	14.57	3.10	114.83	33.64	39.93	6.01	-1.64	0.47	-0.68	0.21
<i>Stop 90</i>	14.59	4.47	130.62	61.39	54.97	11.82	-2.17	0.50	-1.06	0.32
<i>Cédez le passage 90</i>	14.59	3.74	117.67	49.14	49.10	8.65	-2.08	0.52	-0.95	0.28

### Durée de la décélération

L'analyse de variance ne montre pas d'effet significatif de la raison de l'arrêt sur la durée ( $F(4, 1457) = 1.09$ ,  $p = 0.358$ ;  $\text{Eta}^2 = 3.00\text{e-}03$ , 95% CI [0.00, 1.00]). Que ce soit sur le réseau routier limité à 50 km/h ou 90 km/h et peu importe l'infrastructure, la durée de la décélération proprement dite est de l'ordre de 14 secondes (Tableau 14 ; Figure 35a).

### Distance de la décélération

L'analyse de variance montre un effet faible, mais significatif, de la raison de l'arrêt sur la distance de décélération ( $F(4, 1457) = 11.76, p < 0.001; \text{Eta}^2 = 0.03, 95\% \text{ CI } [0.02, 1.00]$ ).

Sur le réseau routier limité à 50 km/h, la distance de décélération en amont d'un arrêt à un stop est de l'ordre de  $129.97 \pm 56.39$  m. Elle est plus élevée que celles observées en amont d'un arrêt à un signal tricolore ( $114.83 \pm 33.64$  m) ou à un passage piéton ( $103.27 \pm 38.67$  m). Les distances sont similaires en amont d'un arrêt à un signal tricolore et à un passage piéton (Tableau 15 ; Figure 35b1).

Sur le réseau routier limité à 90 km/h, la distance de décélération en amont d'un arrêt à un stop est en moyenne de  $130 \pm 61.4$  m significativement supérieure à celle des Cédez le passage avec une distance moyenne de  $117.67 \pm 49.14$  m ( $103.27 \pm 38.67$  m). La variabilité des distances est plus importante sur ce réseau.

**Tableau 15 : Résultats du test de comparaison multiple (Tukey HSD test, fonction TukeyHSD de R) pour la distance de décélération**

contraste	Différence estimée	Borne inférieur de confiance	Borne supérieure de confiance	P-valeur ajustée
<b>Feu tricolore 50-Passage piéton 50</b>	11.556	0.653	22.459	0.031
<b>Cédez le passage 90-Passage piéton 50</b>	14.394	1.378	27.410	0.022
<b>Stop 50-Passage piéton 50</b>	26.693	13.016	40.371	0.000
<b>Stop 90-Passage piéton 50</b>	27.352	13.823	40.881	0.000
<b>Cédez le passage 90-Feu tricolore 50</b>	2.838	-6.455	12.131	0.920
<b>Stop 50-Feu tricolore 50</b>	15.137	4.939	25.336	0.001
<b>Stop 90-Feu tricolore 50</b>	15.796	5.797	25.794	0.000
<b>Stop 50-Cédez le passage 90</b>	12.300	-0.133	24.732	0.054
<b>Stop 90-Cédez le passage 90</b>	12.958	0.689	25.227	0.032
<b>Stop 90-Stop 50</b>	0.658	-12.310	13.626	1.000

### Vitesse initiale

L'analyse statistique montre un effet large et significatif de la raison de l'arrêt sur la vitesse pratiquée au début de la décélération ( $F(4, 1457) = 132.99, p < .001; \text{Eta}^2 = 0.27, 95\% \text{ CI } [0.24, 1.00]$ ).

Sur le réseau routier limité à 50 km/h, la vitesse initiale en amont d'un arrêt à stop est de l'ordre de  $47.68 \pm 17.98$  km/h. Elle est plus élevée que celles observées en amont d'un arrêt à un signal tricolore ( $39.93 \pm 6.01$  km/h) ou à un passage piéton ( $38.40 \pm 5.69$  km/h). Les vitesses sont similaires en amont d'un arrêt à un signal tricolore et à un passage piéton (Tableau 16 ; Figure 35b2).

Sur le réseau routier limité à 90 km/h, la vitesse en amont d'un arrêt à un stop est de l'ordre de  $54.97 \pm 11.82$  km/h. Elle est plus élevée que celle observée en amont d'un arrêt à un cédez le passage ( $49.10 \pm 8.65$  km/h ; Tableau 16 ; Figure 35b2).

La vitesse initiale en amont d'un arrêt à un stop est significativement plus élevée sur le réseau routier limitée à 90 km/h que sur celui limité à 50 km/h.

**Tableau 16 : Résultats du test de comparaison multiple (Tukey HSD test, fonction TukeyHSD de R) pour la vitesse initiale.**

contraste	Différence estimée	Borne inférieure de confiance	Borne supérieure de confiance	P-valeur ajustée
Feu tricolore 50-Passage piéton 50	1.529	-0.791	3.849	0.374
Stop 50-Passage piéton 50	9.276	6.365	12.186	0.000
Cédez le passage 90-Passage piéton 50	10.697	7.928	13.467	0.000
Stop 90-Passage piéton 50	16.570	13.691	19.449	0.000
Stop 50-Feu tricolore 50	7.746	5.576	9.916	0.000
Cédez le passage 90-Feu tricolore 50	9.168	7.191	11.145	0.000
Stop 90-Feu tricolore 50	15.040	12.913	17.168	0.000
Cédez le passage 90-Stop 50	1.422	-1.224	4.067	0.584
Stop 90-Stop 50	7.294	4.535	10.054	0.000
Stop 90-Cédez le passage 90	5.872	3.262	8.483	0.000

### Décélération maximale

L'analyse statistique montre un effet de la raison de l'arrêt sur la décélération maximale observée sur l'ensemble de la décélération ( $F(4, 1457) = 82.84, p < .001; \text{Eta}^2 = 0.19, 95\% \text{ CI } [0.16, 1.00]$ ).

Sur le réseau routier limité à 50 km/h, la décélération maximale en amont d'un arrêt à un stop ( $2.08 \pm 0.41 \text{ m/s}^2$ ) est similaire à celle observée en amont d'un arrêt à un passage piéton ( $1.96 \pm 0.42 \text{ m/s}^2$ ). Ces décélérations sont toutes les deux plus élevées que celle observée en amont d'un arrêt à un signal tricolore ( $- 1.64 \pm 0.47 \text{ m/s}^2$ ; Tableau 14 ; Figure 35c).

Sur le réseau routier limité à 90 km/h, la décélération maximale en amont d'un arrêt à un stop ( $2.17 \pm 0.50 \text{ m/s}^2$ ) est similaire à celle observée en amont d'un arrêt à un cédez le passage ( $2.08 \pm 0.52 \text{ m/s}^2$ ; Tableau 14 ; Figure 35).

La décélération maximale en amont d'un arrêt à un stop est identique sur le réseau routier limitée à 90 km/h et sur celui limité à 50 km/h.

**Tableau 17 : Résultats du test de comparaison multiple (Tukey HSD test, fonction TukeyHSD de R) pour la décélération maximale.**

contraste	Différence estimée	Borne inférieur de confiance	Borne supérieure de confiance	P-valeur ajustée
Stop 50-Stop 90	0.087	-0.053	0.228	0.436
Cédez le passage 90-Stop 90	0.088	-0.046	0.221	0.376
Passage piéton 50-Stop 90	0.204	0.057	0.351	0.001
Feu tricolore 50-Stop 90	0.529	0.421	0.638	0.000
Cédez le passage 90-Stop 50	0.000	-0.135	0.135	1.000
Passage piéton 50-Stop 50	0.117	-0.032	0.265	0.201
Feu tricolore 50-Stop 50	0.442	0.331	0.552	0.000
Passage piéton 50-Cédez le passage 90	0.117	-0.025	0.258	0.161
Feu tricolore 50-Cédez le passage 90	0.442	0.341	0.542	0.000
Feu tricolore 50-Passage piéton 50	0.325	0.207	0.443	0.000

### Décélération moyenne

L'analyse statistique montre un effet important et significatif de la raison de l'arrêt sur la décélération moyenne du profil de décélération proprement dit ( $F(4, 1457) = 109.62, p < .001; \text{Eta}^2 = 0.23, 95\% \text{ CI } [0.20, 1.00]$ ).

Sur le réseau routier limité à 50 km/h, la décélération moyenne en amont d'un arrêt à un stop est de l'ordre de  $0.83 \pm 0.30 \text{ m/s}^2$ . Elle est plus élevée que celles observées en amont d'un arrêt à un signal tricolore ( $0.68 \pm 0.21 \text{ m/s}^2$ ) ou à un passage piéton ( $0.72 \pm 0.25 \text{ m/s}^2$ ). Les décélération moyennes sont similaires en amont d'un arrêt à un signal tricolore et à un passage piéton (Tableau 14 ; Figure 35d).

Sur le réseau routier limité à 90 km/h, la décélération moyenne en amont d'un arrêt à un stop ( $1.06 \pm 0.32 \text{ m/s}^2$ ) est supérieure à celle observée en amont d'un arrêt à un cédez le passage ( $0.95 \pm 0.28 \text{ m/s}^2$  ; Tableau 14 ; Figure 35d).

La décélération moyenne en amont d'un arrêt à un stop est supérieure sur le réseau routier limitée à 90 km/h que sur celui limité à 50 km/h.

**Tableau 18 : Résultats du test de comparaison multiple (Tukey HSD test, fonction TukeyHSD de R) pour la décélération moyenne.**

contraste	Différence estimée	Borne inférieur de confiance	Borne supérieure de confiance	P-valeur ajustée
<b>Cédez le passage 90-Stop 90</b>	0.114	0.043	0.185	0.000
<b>Stop 50-Stop 90</b>	0.226	0.151	0.301	0.000
<b>Passage piéton 50-Stop 90</b>	0.337	0.259	0.415	0.000
<b>Feu tricolore 50-Stop 90</b>	0.378	0.320	0.436	0.000
<b>Stop 50-Cédez le passage 90</b>	0.112	0.041	0.184	0.000
<b>Passage piéton 50-Cédez le passage 90</b>	0.223	0.148	0.298	0.000
<b>Feu tricolore 50-Cédez le passage 90</b>	0.264	0.211	0.318	0.000
<b>Passage piéton 50-Stop 50</b>	0.110	0.031	0.189	0.001
<b>Feu tricolore 50-Stop 50</b>	0.152	0.093	0.211	0.000
<b>Feu tricolore 50-Passage piéton 50</b>	0.041	-0.022	0.104	0.376

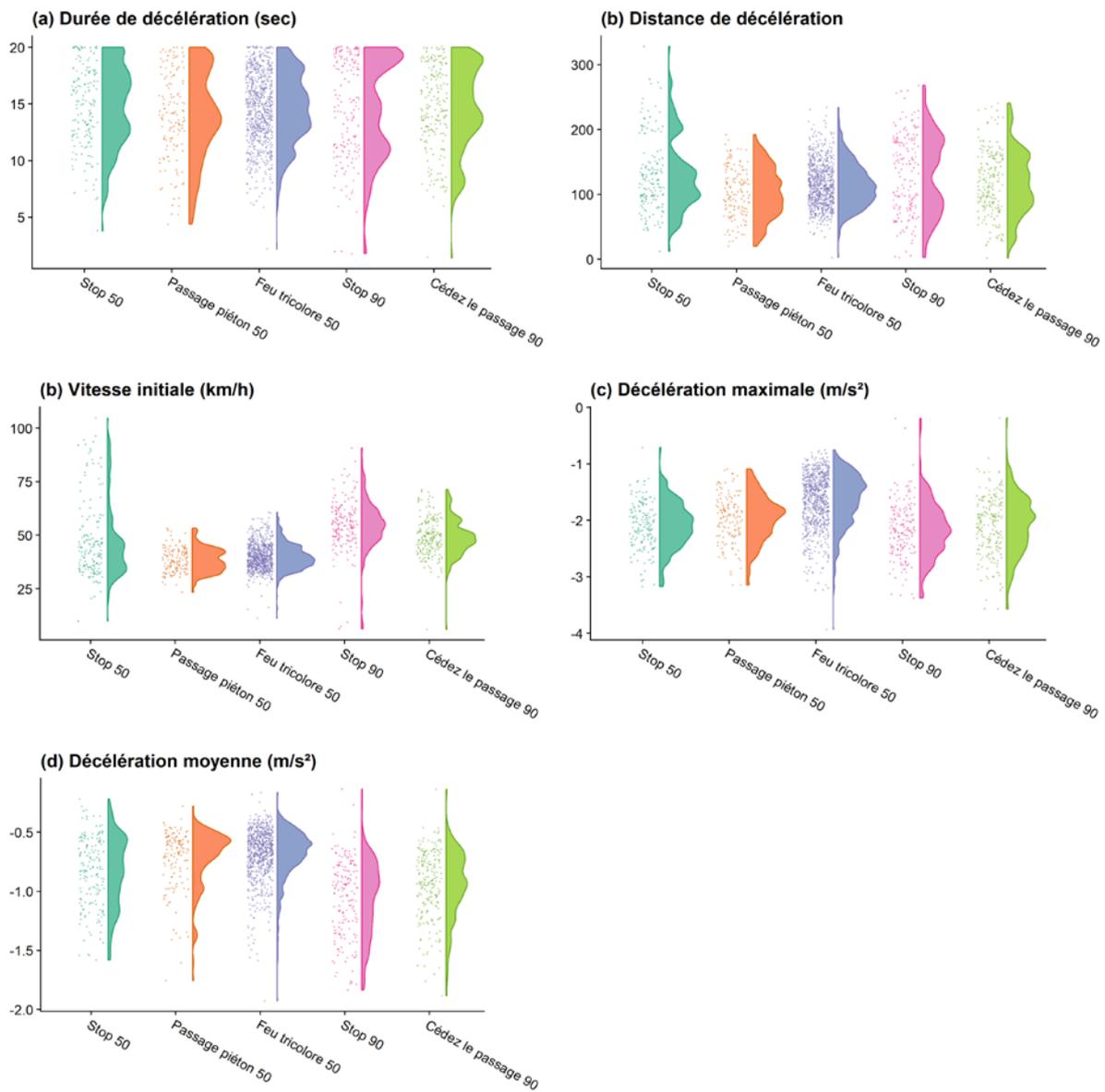


Figure 35 : Visualisation (raincloud plots) des 5 indicateurs selon l'infrastructure ayant causé l'arrêt. Les différences significatives ( $\alpha=5\%$ ) sont indiquées par des lettres. Si deux infrastructures ont au moins une lettre en commun alors les différences entre ces deux infrastructures sont non significatives.

### Modélisation des profils de vitesse et de décélération en fonction de la distance

#### Modélisation des profils de vitesse

La première approche empirique permet d'obtenir des profils de vitesse moyenne en fonction de la distance selon les raisons de l'arrêt. Ainsi, on peut constater, malgré la largeur des intervalles de confiance, des différences marquées dans les vitesses d'approche selon les raisons de l'arrêt (Figure 36). On observe logiquement des vitesses supérieures pour les raisons d'arrêt en zone 90 km/h, mais un comportement similaire entre « Cédez le passage 90 » et le « Stop 50 ».

L'approche empirique permet de calculer un profil moyen et son intervalle de variation, mais ne permet pas d'attester de différences significatives entre les trajectoires. Selon Akçelik & Besley (2001), la décélération d'un véhicule peut se modéliser de manière pertinente par un polynôme de degré 3, dont les paramètres peuvent se déduire de caractéristiques physiques du véhicule. Dans le cas d'une flotte de véhicules, ou plutôt d'une collection de profils de décélération générés par différents véhicules (non identiques), il est possible d'estimer ces paramètres grâce à un modèle de régression polynomiale.

L'analyse descriptive a apporté la preuve de différences dans les caractéristiques des décélérations, tout en mettant en évidence la nécessité de prise en compte de la covariable VMA (vitesse maximale autorisée). Ainsi, nous faisons le choix d'utiliser la variable combinée raison de l'arrêt comme variable indépendante dans une modélisation paramétrique polynomiale de degré 3. Ainsi le modèle proposé est un modèle linéaire (moindre carrés ordinaires) associant la vitesse instantanée (variable Vitesse) à la distance avant l'arrêt (variable Distance) et à la raison de l'arrêt (raison de l'arrêt) sous une forme polynomiale de degré 3 (formule :  $Vitesse \sim Distance * raison\ de\ l'arrêt + Distance^2 * raison\ de\ l'arrêt + Distance^3 * raison\ de\ l'arrêt$ ). Les résultats de cette estimation sont fournis au Tableau 19. Les intervalles de confiance à 95% (CI) et les p-valeurs (p) sont calculés selon la méthode de Wald. La constante du modèle (Intercept) correspond à une valeur de Distance=0, et à la modalité « Feu tricolore 50 ». C'est la valeur estimée de la vitesse au moment de l'arrêt pour les feux tricolores. Sa valeur non nulle et positive (11.2 km/h) traduit une difficulté bien connue lors d'une estimation polynomiale avec des points régulièrement répartis. En outre, le point correspondant à Distance=0 dans nos profils de décélération est en fait le premier point observé avec une vitesse inférieure à 4km/h. Il est donc normal de ne pas obtenir une estimation voisine de 0 pour ce point précis. Ce sont les estimations finales relatives entre les différentes infrastructures qui nous intéressent dans le cadre de cette étude.

Ce modèle explique une proportion substantielle et statistiquement significative de la variance totale ( $R^2 = 0.56$ ,  $F(19, 148720) = 9950.97$ ,  $p < .001$ , adj.  $R^2 = 0.56$ ). La majorité des effets estimés sont significatifs, excepté les interactions [Stop 50] \* Distance<sup>2</sup> et [Stop 50] \* Distance<sup>3</sup> qui traduisent une grande proximité dans l'allure des courbes « Stop 50 » et « Feu tricolore 50 » (Figure 37). Les effets fixes associées aux modalités de *raison de l'arrêt* traduisent des différences significatives en termes d'effets fixes additifs, cad la différence de vitesse moyenne entre ces modalités et la modalité de référence [feu tricolore 50]. Les effets croisés (interactions entre la variable Distance et la variable *raison de l'arrêt*) sont significatifs et traduisent la « forme » de la décélération. Ainsi le coefficient - 0.19 (associé à la combinaison Distance \* [Stop 90]) est le plus important des quatre coefficients estimés, et traduit une décroissance plus rapide de la vitesse en fonction de la distance par rapport à la référence. Les autres coefficients peuvent être analysés de la même manière mais ont des valeurs très faibles, et il est plus pertinent de commenter le graphique des différentes fonctions obtenues pour chaque infrastructure (Figure 37).

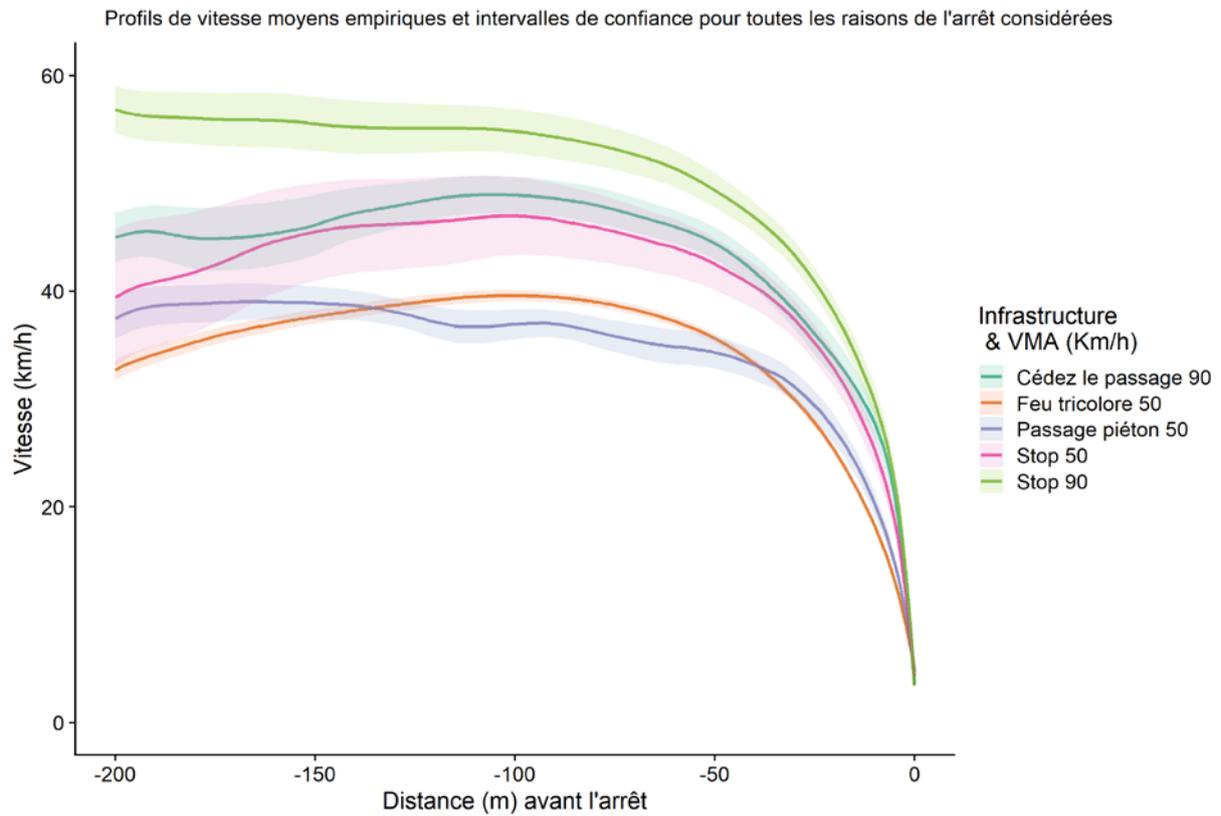


Figure 36 : Profils de vitesse moyens empiriques en fonction de la distance.

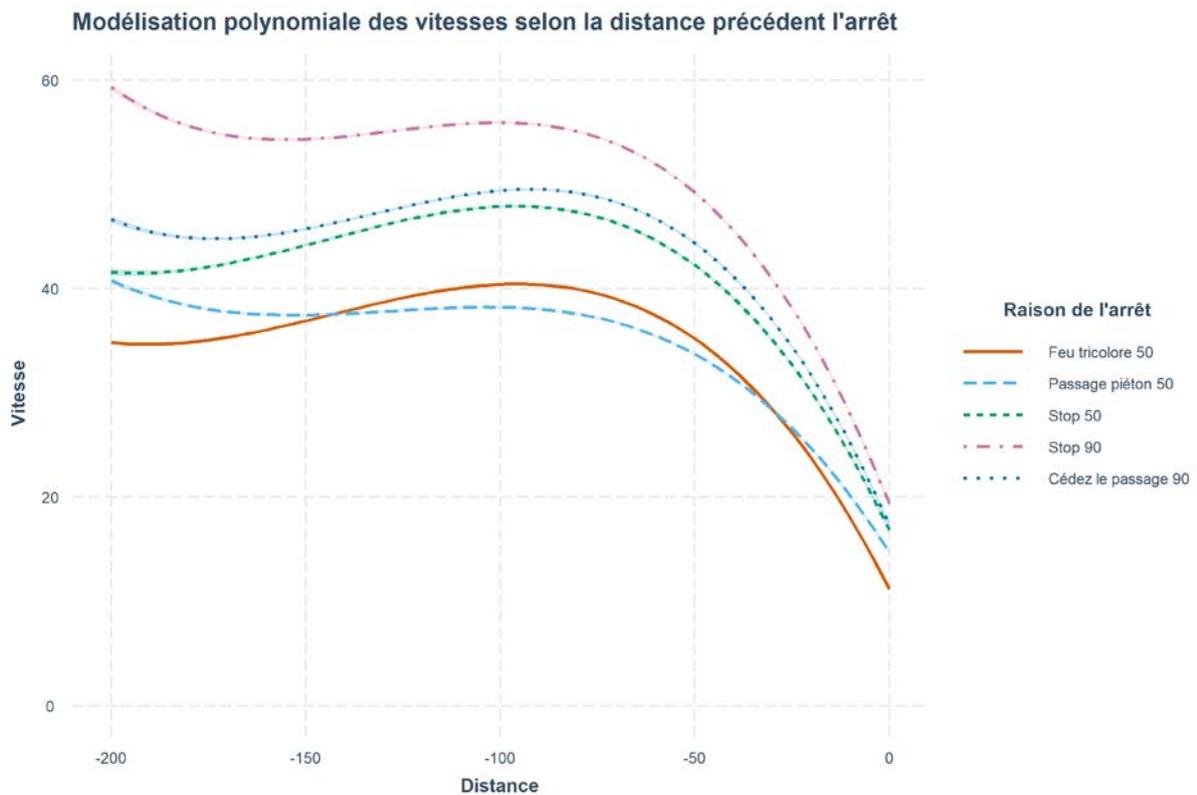


Figure 37 : Modélisation polynomiale de la vitesse en fonction de la distance.

**Tableau 19 : Modèle polynomial de la vitesse selon la distance et la raison de l'arrêt pour les manœuvres d'arrêt effectuées sur des sections de route avec une vitesse maximale autorisée de 50 ou 90 km/h. Pour chaque prédicteur du modèle, les coefficients estimés, l'intervalle de confiance et la probabilité sont indiqués.**

Prédicteurs	Vitesse		
	Coefficients estimés	IC	p
(Intercept)	11.20	11.00 – 11.39	<0.001
Distance	-0.74	-0.74 – -0.73	<0.001
[Passage piéton 50]	3.53	2.98 – 4.08	<0.001
[Stop 50]	5.67	5.08 – 6.26	<0.001
[Stop 90]	8.19	7.65 – 8.73	<0.001
[Cédez le passage 90]	6.16	5.64 – 6.68	<0.001
Distance^2	-0.01	-0.01 – -0.01	<0.001
Distance^3	-0.00	-0.00 – -0.00	<0.001
Distance * [Passage piéton 50]	0.15	0.12 – 0.17	<0.001
Distance * [Stop 50]	-0.04	-0.07 – -0.01	0.002
Distance * [Stop 90]	-0.19	-0.22 – -0.17	<0.001
Distance * [Cédez le passage 90]	-0.11	-0.14 – -0.09	<0.001
[Passage piéton 50] * Distance^2	0.00	0.00 – 0.00	<0.001
[Stop 50] * Distance^2	-0.00	-0.00 – 0.00	0.084
[Stop 90] * Distance^2	-0.00	-0.00 – -0.00	<0.001
[Cédez le passage 90] * Distance^2	-0.00	-0.00 – -0.00	<0.001
[Passage piéton 50] * Distance^3	0.00	0.00 – 0.00	0.016
[Stop 50] * Distance^3	-0.00	-0.00 – 0.00	0.359
[Stop 90] * Distance^3	-0.00	-0.00 – -0.00	<0.001
[Cédez le passage 90] * Distance^3	-0.00	-0.00 – -0.00	<0.001
Observations	148740		
R2 / R2 adjusted	0.560 / 0.560		

La modélisation permet de mettre en évidence des vitesses d'approche plus élevées pour la modalité « Stop 90 », et une similarité de comportement entre « Stop 50 » et « Cédez le passage 90 ». Les arrêts générés par les « Feu tricolore 50 » présentent des vitesses d'approche plus faibles.

Ainsi la vitesse moyenne de « Feu tricolore 50 » présente une différence moyenne de 3.53 km/h avec la modalité « Passage piéton 50 », de 5.67 km/h (resp 6.16) avec la modalité « Stop 50 » (resp « Cédez le passage 90 »), et de 8.19 km/h avec la modalité « Stop 90 ».

Il est notable que le point d'inflexion des courbes de vitesse se situe entre 100m et 90m avant l'arrêt pour toutes les raisons de l'arrêt, signe d'une phase finale de décélération qui se fait sur une distance équivalente quel que soit la vitesse d'approche. Plus la vitesse d'approche sera élevée, plus la décélération sera forte.

#### Modélisation des profils de décélération

Afin de confirmer cela et d'affiner l'analyse des comportements lors des manœuvres d'arrêt, une approche équivalente est proposée pour modéliser les courbes de décélération. Les profils de décélération moyens en fonction de la distance sont plus difficilement lisibles que les profils de vitesses moyennes et les intervalles de confiance qui se chevauchent ne permettent pas de conclure quant à des différences significatives (Figure 38). On peut noter toutefois des différences dans la phase finale des séquences, notamment en terme de maximum de la décélération. Néanmoins ces différences ont été discutées dans la section précédente à l'aide d'une analyse de variance, et font état d'une

différence significative entre les « Feu tricolore 50 » et les autres modalités, comme on peut aussi le lire sur le graphique.

L'accélération, sous sa forme lissée, est modélisée en fonction de la distance, par un modèle identique au précédent (Polynôme d'ordre 3). Les paramètres de ce modèle sont présentés au Tableau 20 et les courbes obtenues à la Figure 39.

Ce modèle explique une proportion substantielle et statistiquement significative de la variance totale ( $R^2 = 0.44$ ,  $F(19, 148720) = 6166.26$ ,  $p < .001$ , adj.  $R^2 = 0.44$ ) et permet une lecture plus claire des comportements que l'approche empirique précédente.

Ainsi, à partir des paramètres estimés on peut déduire que la modalité « Feu tricolore 50 » présente la décélération moyenne la plus faible ( $-1.39 \text{ m/s}^2$ ) : la différence avec « Passage piéton 50 » est de  $0.26 \text{ m/s}^2$  (soit  $-1.65 \text{ m/s}^2$ ), de  $0.35 \text{ m/s}^2$  avec « Stop 50 », de  $-0.44 \text{ m/s}^2$  avec « Stop 90 » et de  $-0.14 \text{ m/s}^2$  avec « Cédez le passage 90 ». Les décélérations moyennes les plus fortes sont observées pour la modalité « Stop 90 », ce qui confirme les observations précédentes sur les vitesses.

Les accélérations deviennent négatives autour de 100 m avant le point d'arrêt final. La décélération commence plus en amont pour les « Stop 90 » (140m avant l'arrêt). Pour les « Passage piéton 50 », la situation est particulière car elle présente une décélération en deux phases, une première largement en amont du point final (170 m), suivi d'un plateau (permettant une vitesse constante d'après les observations précédentes) et d'une phase finale de décélération tardive 70 m avant l'arrêt. Cela correspond bien à l'intuition que l'on peut se faire d'un comportement préventif face à un arrêt incertain.

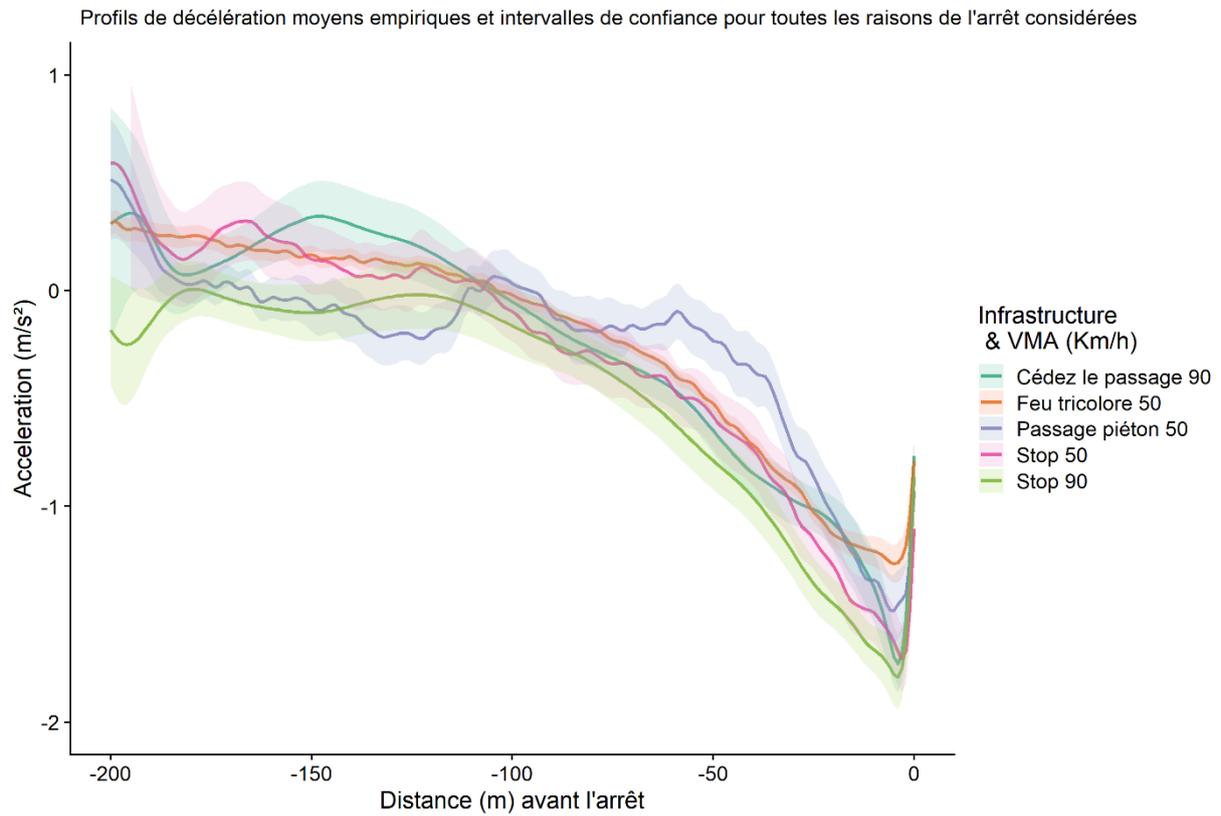


Figure 38 : Profils de décélération moyens empiriques.

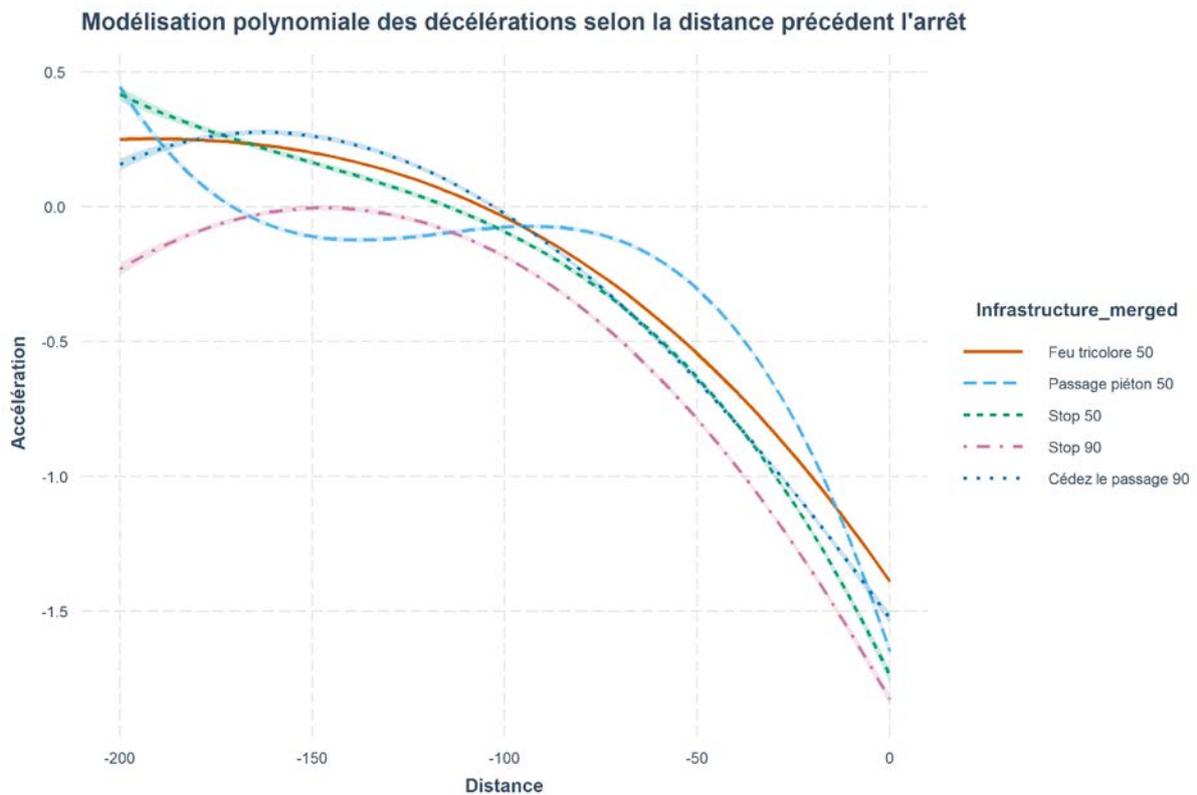


Figure 39 : Modélisation polynomiale de la décélération.

**Tableau 20 : Modèle polynomial de l'accélération selon la distance et la raison de l'arrêt pour les manœuvres d'arrêt effectuées sur des sections de route avec une vitesse maximale autorisée de 50 ou 90 km/h. Pour chaque prédicteur du modèle, les coefficients estimés, l'intervalle de confiance et la probabilité sont indiqués.**

Prédicteurs	Accélération		
	Coefficients estimés	IC	p
(Intercept)	-1.39	-1.40 – -1.38	<0.001
Distance	-0.02	-0.02 – -0.02	<0.001
[Passage piéton 50]	-0.26	-0.30 – -0.22	<0.001
[Stop 50]	-0.35	-0.39 – -0.31	<0.001
[Stop 90]	-0.44	-0.48 – -0.40	<0.001
[Cédez le passage 90]	-0.14	-0.17 – -0.10	<0.001
Distance^2	-0.00	-0.00 – -0.00	<0.001
Distance^3	-0.00	-0.00 – -0.00	<0.001
Distance * [Passage piéton 50]	-0.02	-0.02 – -0.02	<0.001
Distance * [Stop 50]	-0.01	-0.01 – -0.01	<0.001
Distance * [Stop 90]	-0.00	-0.01 – -0.00	<0.001
Distance * [Cédez le passage 90]	0.00	-0.00 – 0.00	0.262
[Passage piéton 50] * Distance^2	-0.00	-0.00 – -0.00	<0.001
[Stop 50] * Distance^2	-0.00	-0.00 – -0.00	<0.001
[Stop 90] * Distance^2	-0.00	-0.00 – 0.00	0.454
[Cédez le passage 90] * Distance^2	0.00	0.00 – 0.00	<0.001
[Passage piéton 50] * Distance^3	-0.00	-0.00 – -0.00	<0.001
[Stop 50] * Distance^3	-0.00	-0.00 – -0.00	<0.001
[Stop 90] * Distance^3	0.00	0.00 – 0.00	0.016
[Cédez le passage 90] * Distance^3	0.00	0.00 – 0.00	<0.001
Observations	148740		
R2 / R2 adjusted	0.441 / 0.441		

## Discussion et conclusion

Ces travaux ont exploité plus de 6000km de données routières générées par plus de 150 participants à bord d'un véhicule instrumenté et dans des conditions variées (urbain & inter-urbain). Au total, 2677 séquences de décélération (sur les 10896 identifiées) ont répondu aux critères de sélection ont été associées à l'infrastructure la plus probable ayant causée l'arrêt.

Une première analyse descriptive a été menée sur ces décélérations, mettant en évidence des différences significatives dans les indicateurs les caractérisant. Cela nous permet de définir un seuil de distance de 200m pour mener une analyse des courbes de décélération, notamment via l'estimation d'un modèle polynomial d'ordre 3, autant pour la vitesse que pour l'accélération (signal lissé).

Ces analyses mettent en évidence des différences significatives de comportements de décélération selon la raison de l'arrêt :

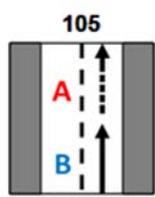
- La modélisation permet de mettre en évidence des vitesses d'approche plus élevées pour la modalité « Stop 90 », et une similarité de comportement entre « Stop 50 » et « Cédez le passage 90 ».
- Les arrêts générés par les « Feu tricolore 50 » présentent des vitesses d'approche et des décélérations moyennes (modélisées) plus faibles que les autres situations.
- Les arrêts générés par les « Stop 90 » présentent une vitesse d'approche plus élevée, mais un premier instant de décélération à peine plus distant de l'arrêt final que les autres situations, induisant des phases finales de décélération en moyenne plus marquées que les autres (i.e. valeurs de décélération plus grandes).
- Les arrêts générés par les « Passage piéton 50 » présentent une première phase de décélération très en amont de l'arrêt final, suivi d'un plateau de vitesse, et enfin une phase finale de décélération plus tardive.
- Les arrêts générés par « Stop 50 » et « Cédez le passage 90 » sont très similaires avec un comportement « intermédiaire » entre « Stop 90 » et « Feu tricolore 50 ».
- La distance à l'arrêt pour laquelle a lieu le premier instant de décélération est très similaire entre les raisons d'arrêt, ce quel que soit la vitesse d'approche. Cela induit des phases finales significativement différentes en termes d'ampleur de la décélération.

Contrairement aux travaux précédents, portant plutôt sur les liens entre la vitesse d'approche et la décélération, nous avons mise en évidence que la raison de l'arrêt (infrastructure ou régime de priorité) induisait aussi des différences significatives sur les manœuvres d'arrêt effectuées par des conducteurs humains. Ainsi, ces différences subtiles mais significatives, laissent penser que cela peut jouer dans la bonne anticipation du comportement des VA par les humains.

Ces travaux ont donné lieu à des recommandations qui sont détaillées dans la conclusion de ce livrable.

## Analyse des situations observées lors d'accidents

La base de données EDA-LAB de 2005 à 2019 contient 33 accidents VL/VL ou VL/VUL associés au pictogramme 105.



Un véhicule heurte l'arrière du véhicule précédent qui ralentissait.

(A – Véhicule supposé automatisé B – VL/VUL)

L'analyse descriptive de cet échantillon a été faite en utilisant les variables décrites ci-dessous :

- Origine de ralentissement : la configuration (infrastructure), la pression situationnelle induisant une manœuvre de ralentissement ou d'arrêt du véhicule A.
- Type d'infrastructure : la géométrie de la route sur le lieu de l'accident (section courante, intersection, rond-point)
- Type de signalisation : Feu tricolore, cédez – le passage...).
- Vitesse au choc du véhicule percuté (supposé véhicule automatisé) et du véhicule percutant (véhicule conventionnel) : est la vitesse du véhicule impliqué dans un accident immédiatement avant le choc.
- Décélération avant choc des deux véhicules : l'intensité du freinage
- Manœuvre avant choc du véhicule percuté : l'action réalisé par le véhicule percuté immédiatement avant le choc.
- Manœuvre d'urgence avant l'accident du véhicule percutant : l'action réalisé par le véhicule percutant immédiatement avant le choc.
- Les éléments explicatifs : paramètres qui ont contribué à l'émergence de la défaillance fonctionnelle face à la situation routière à gérer (état de santé de l'utilisateur, état de la route, éblouissement par le soleil,...)

Les résultats de l'analyse sont présentés ci-dessous.

### Origine de ralentissement

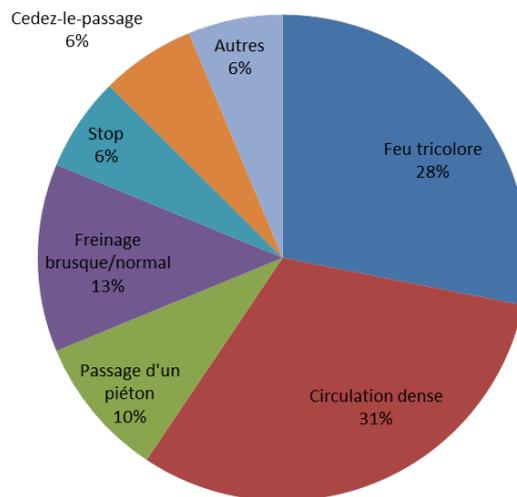


Figure 40 : Origine du ralentissement.

\*\*Autres (Véhicule sur la route suite à une perte de contrôle, voie d'insertion, marche arrière)

Dans 1/3 des accidents de notre échantillon, la circulation dense est à l'origine du ralentissement. Le freinage brusque représente 13% des cas. Pour le reste des accidents la présence d'une signalisation est la cause du ralentissement: feu tricolore (28%), passage piéton (10%), stop (6%) stop et cédez-le-passage (6%).

### Type d'infrastructure

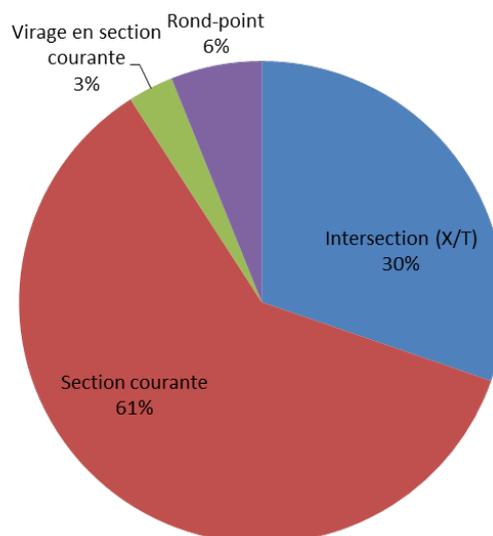


Figure 41 : Type d'infrastructure.

La grande majorité des accidents ont lieu en section courante 61 %. S'en suit les intersections qui concernent 30 % des accidents. Les ronds-points et virages présentent des parts plus faibles respectivement 6 et 3 %.

### Type de signalisation

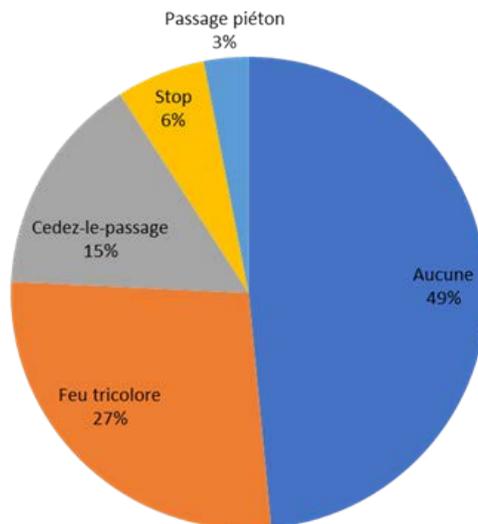


Figure 42 : signalisation

Environ pour la moitié des accidents aucune signalisation n'est présente. Le feu tricolore, cédez – le passage et stop sont présents respectivement dans 27%, 15% et 6 % des accidents.

#### Vitesse au choc du véhicule percuté (supposé véhicule automatisé) et du véhicule percutant (véhicule conventionnel)

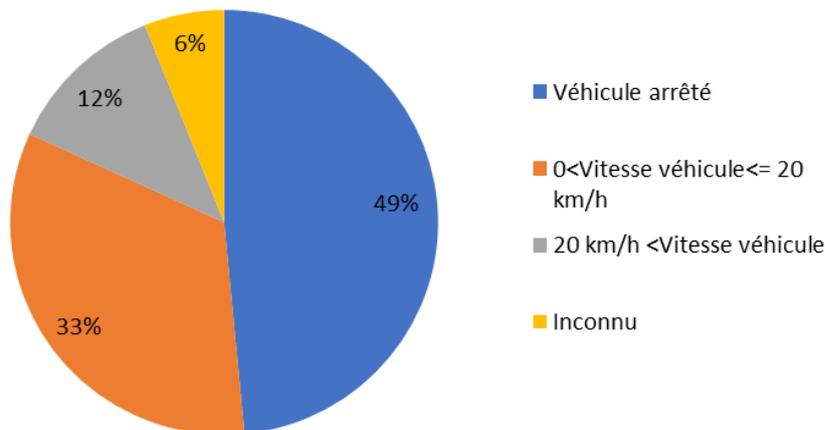
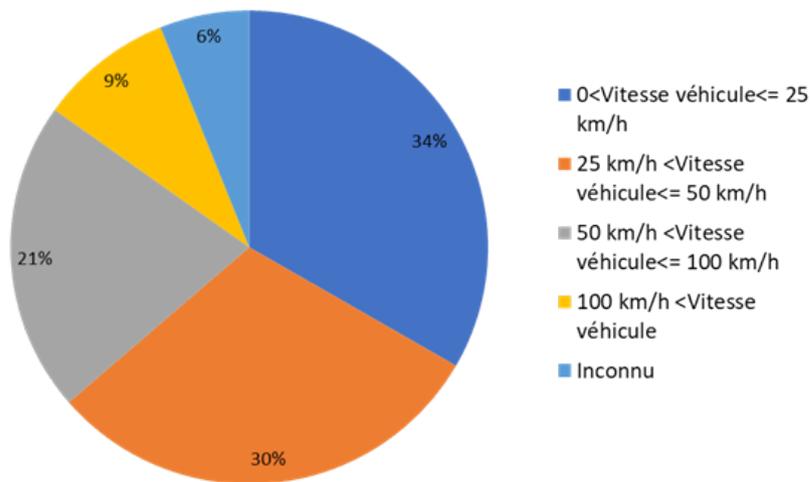


Figure 43 : vitesse du véhicule percuté - A

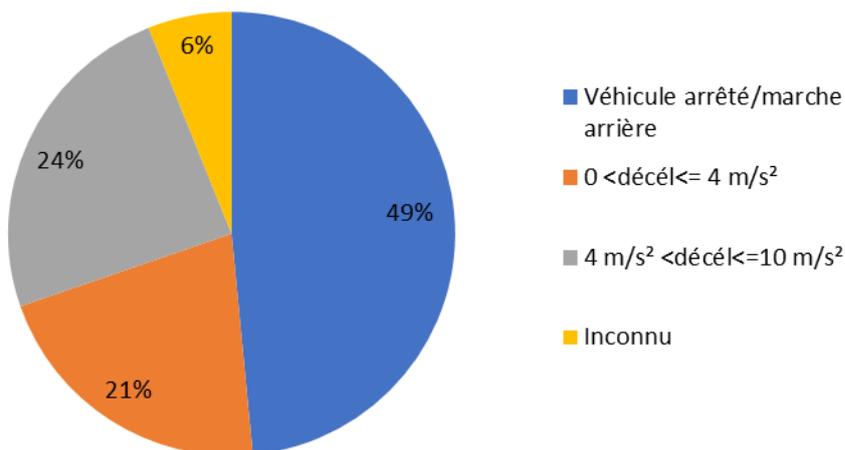
49 % des véhicules étaient totalement à l'arrêt. Et 45 % en circulation. Parmi eux, 33 % circulaient à moins de 20 km/h et 12% avaient une vitesse supérieure à 20 km/h.



En Revanche concernant le véhicule percutant, pour 34 % des cas, la vitesse au choc est inférieure à 25 km/h. Une vitesse entre 25 et 50 Km/h concerne 30 % des cas. Environ 21% ont une vitesse entre 50 et 100 km/h. 9 % ont une vitesse supérieure à 100 km/h.

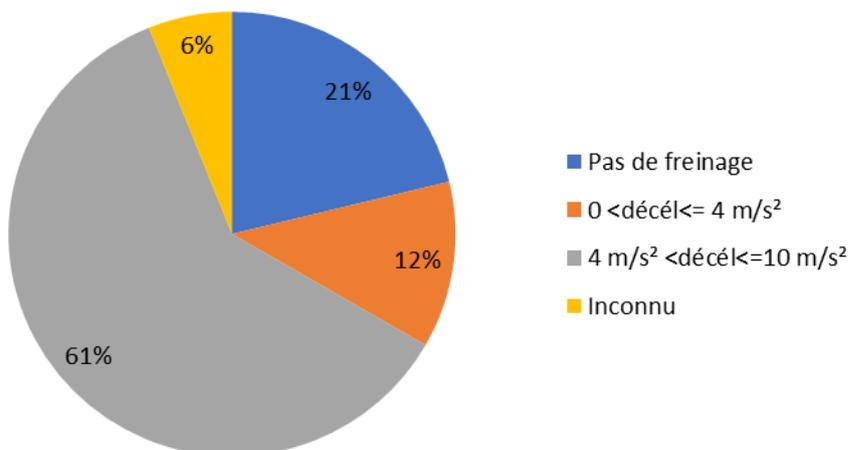
Figure 44 : vitesse du véhicule percutant - B

**Décélération avant choc du véhicule percuté (supposé véhicule automatisé) et du véhicule percutant (véhicule conventionnel)**



On retrouve les 49 % des véhicules totalement à l’arrêt. 21 % des véhicules ont une décélération modérée comprise entre 0 et 4 m/s². Près des 1/4 des véhicules sont en freinage d’urgence entre 4 et 10 m/s².

Figure 45 : décélération véhicule percuté - A



Dans la majorité des cas on a une réaction d’urgence du conducteur, mais elle est malheureusement tardive elle concerne 61 % des cas. Dans 12 % des cas on a un freinage comprise entre 0 et 4 m/s². Pour 21 % des conducteur il y a une absence totale de la perception du danger, le conducteur ne freine pas.

Figure 46 : décélération du véhicule percutant - B

### Manœuvre avant choc

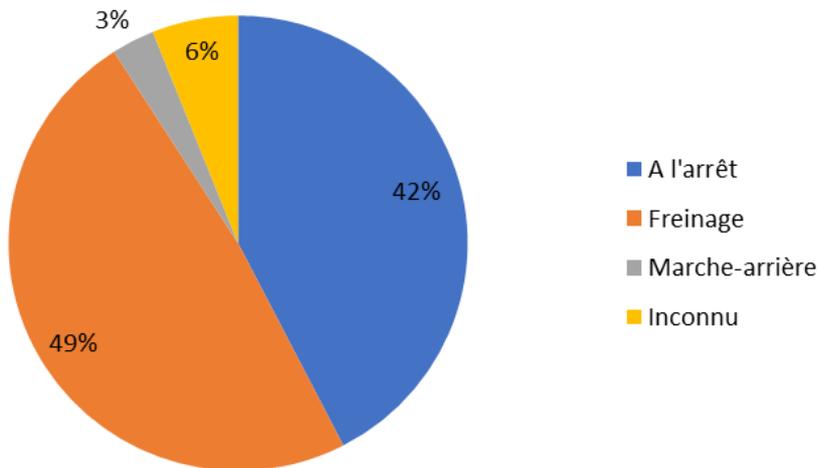


Figure 47 : manœuvre avant choc du véhicule percuté - A

Concernant le véhicule percuté, 42 % étaient à l'arrêt. Les véhicules en freinage concernent 49 % des cas. Dans 3 % des cas le véhicule effectue une marche arrière.

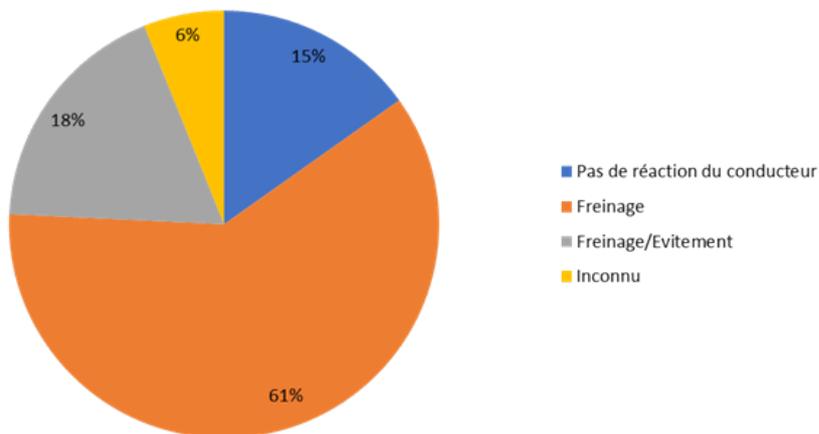
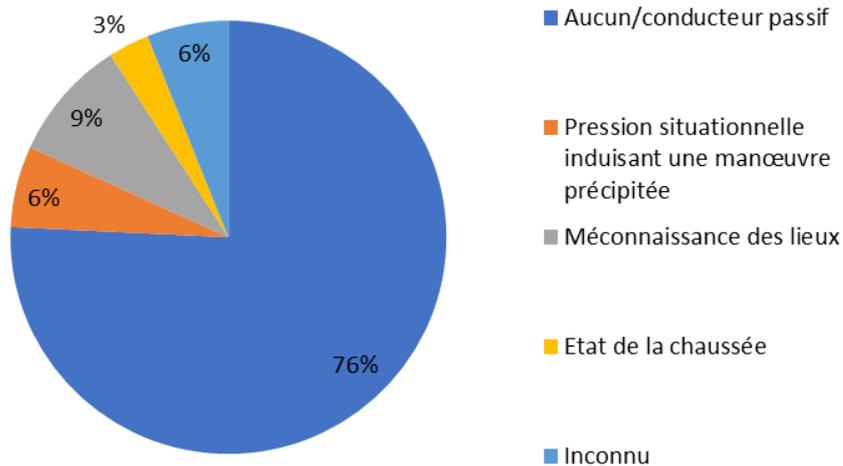


Figure 48 : manœuvre avant choc du véhicule percutant - B

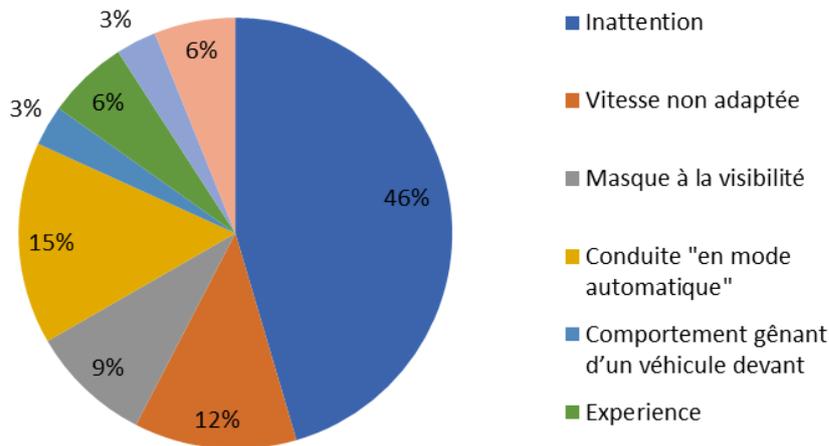
Dans la majorité des cas on a une réaction d'urgence du conducteur, elle concerne 61 % des cas avec une tentative de freinage. 18 % des conducteurs réagissent en combinant freinage et/ou tentative d'évitement. Seulement 15 % des conducteurs ne perçoivent pas le danger.

### Les éléments explicatifs



Plus de  $\frac{3}{4}$  des conducteurs sont passifs, ils ne sont pas à l'origine de l'accident et ils n'ont aucun moyen de l'éviter. Dans 9 % des cas on a une méconnaissance des lieux. Pour 6 % des conducteurs il y a une manœuvre précipitée dû à une pression situationnelle. Et enfin dans 3 % des cas, on a une dégradation/pollution de la chaussée entraînant un freinage brusque du conducteur.

Figure 49 : les éléments explicatifs du véhicule percuté - A



Pour les véhicules percutant, l'inattention est la principale cause avec 46 % des cas. 15 % des conducteurs sont en « mode automatique » avec un bas niveau attentionnel lié à une forte expérience du trajet et/ou à sa monotonie. Dans 12 % des cas on a une vitesse non adapté à la situation. Les problématiques de détection avec une présence de masque à la visibilité concernent 9 % des cas. L'expérience du conducteur et un comportement gênant d'un véhicule circulant devant présentent des parts plus faibles respectivement 6% et 3 %.

Figure 50 : les éléments explicatifs du véhicule percutant - B

## VI- Conclusions et recommandations

Les travaux menés dans cette tâche ont cherché à identifier les nouveaux risques éventuels liés à l'introduction des VA dans le trafic. Pour cela, de nombreuses sources de données de conduite issues de précédents travaux ont été analysées pour comprendre les facteurs agissants sur la survenue de situations de conduites à risque. En préalable une réflexion (Livrable L4.1 : Sélection des scénarios d'interaction qui seront retenus pour les analyses plus fines) a été menée par un collectif d'expert du véhicule autonome et de l'accidentologie pour identifier les scénarios de conduites à fort enjeu du point de vue de la sécurité routière des VA. Au terme de ce travail, deux situations de conduite semblent prioritaires pour des analyses plus poussées :

- Les situations de déboitement, rabattement et insertions.
- Les manœuvres d'arrêt.

Chacune de ces situations de conduite a été recherchée, soit dans des données de conduite recueillies en situation naturelle (BDD Moove-Vedecom, BDD UDrive-CEESAR, BDD Cerema-Uni Eiffel), soit dans des études détaillées d'accidents (LAB).

Les travaux menés ont donc suivi ce cheminement, et le lecteur pourra se reporter au résumé général, en page 4 de ce document, pour une revue rapide des principaux résultats.

Les résultats présentés dans ce livrable ont été partagés et discutés au sein de la communauté SURCA. La mise en commun des différents travaux du projet, et l'échange des différents points de vues et approches, a permis d'aboutir à des recommandations avec un objectif opérationnel pour les différents acteurs du secteur (concepteurs de VA ou de cartes HD, gestionnaire d'infrastructure, législateur, etc.). Les recommandations présentées ci-dessous sont issues de travaux menés dans le cadre du WP 9, dont l'objectif est de fournir des recommandations dans les cinq registres suivants :

- les besoins de communication du véhicule autonome en phase active avec les autres usagers,
- les postures acceptables selon les systèmes de retenue,
- les compléments de formation des conducteurs,
- les effets de l'introduction des VA,
- les besoins des conducteurs âgés.

Les recommandations remontées des différents WP ont été analysées selon cinq groupes de discussion (5 à 10 personnes) :

- Cut in sur voies séparées,
- Formation/information/pouvoirs Publics/Conception Infra,
- Prévisibilité homogénéité versus comportement conducteur (respect code la route ?),
- Prise en compte des comportements difficilement prévisibles des usagers vulnérables,
- Situations à savoir gérer,

Elles ont ensuite été validées en réunion plénière des partenaires. Les recommandations ont ensuite été regroupées selon les catégories suivantes :

- Formation
- Communication
- Sécurité passive
- Gestion des cut-in et changement de voies sur autoroute
- VA et réglementation/règles de l'art
- Gestion des cyclistes aux carrefour à feux

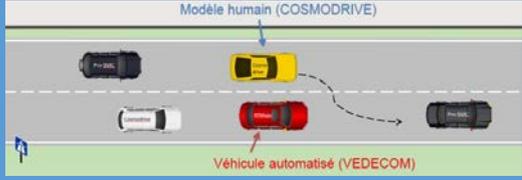
- Gestion des piétons
- Gestion des situations complexes
- Adaptation du VA au contexte

Un formalisme commun a été adopté, consistant à compléter les éléments suivants pour chaque catégorie de recommandation :

Texte complet des recommandations de la catégorie		Illustration
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Texte 1</li> <li>2. Texte 2</li> </ol>		
<b>Pourquoi :</b> Justification principale de chaque recommandation	<b>Matériel :</b> Matériel et données sur lesquels s'appuient les recommandations	<b>Limites :</b> Limites scientifiques identifiées

Seules les recommandations s'appuyant entièrement ou pour partie sur les travaux et résultats de ce livrable sont présentées ci-après. Notons toutefois que les variantes de ces recommandations adaptées aux 2RM sont aussi conservées par souci de cohérence, mais sont issues des travaux menés dans le WP5 décrits dans les livrables associés (cf. <https://surca.univ-gustave-eiffel.fr/>).

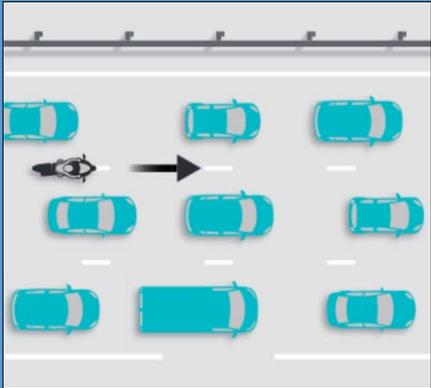
### Recommandations pour gérer les cut-in par anticipation

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Anticiper un ralentissement du trafic au-delà du véhicule s’insérant en réduisant le différentiel de vitesse</li> <li>2. Augmenter ses distances de sécurité pour éviter les rabattements risqués</li> <li>3. Détecter des signes de rabattement agressifs pour anticiper le freinage et/ou se signaler et/ou changer de voie</li> </ol>	
<p><b>Pourquoi :</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Un différentiel de vitesse de plus de 30 km/h entre les voies induit plus de cut-in agressifs</li> <li>2. Moins de cut-in en augmentant le temps inter véhiculaire</li> <li>1. Une anticipation (freinage et/ou signalement et/ou changement de voie) permet de réduire les risques de complication d’un cut in agressifs</li> </ol>	<p><b>Matériel :</b></p> <p>1 2 3 : Données naturalistiques de conduite 3 : Analyse d’incidents</p> <p><b>Limites :</b></p> <p>1 2 : Nombre réduit de conducteurs 3 : Avis d’expert 1 2 3 : Contexte autoroutier</p>

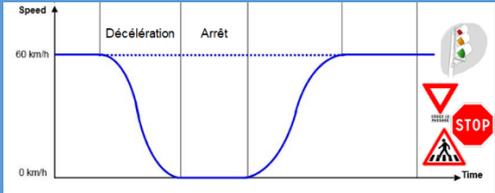
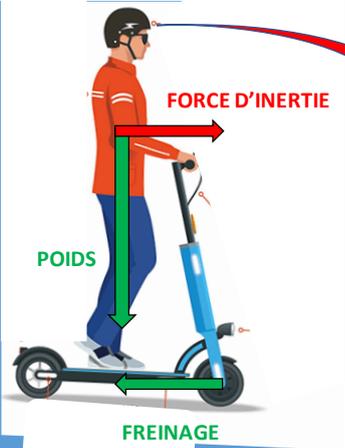
### Recommandations pour réduire les conséquences des cut-in

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Limiter la décélération maximale du VA quand il subit un cut-in serré pour éviter de surprendre le véhicule suiveur</li> <li>2. Si la vitesse relative du 2RM est positive ou nulle, le VA ne doit pas freiner même si le temps inter-véhiculaire est court</li> <li>3. Si un véhicule roulant sur une voie d’insertion semble vouloir s’insérer devant un VA, celui-ci doit adapter son inter-distance avec le véhicule qui le précède pour faciliter l’insertion</li> </ol>	
<p><b>Pourquoi :</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Risque de choc fronto-arrière ou de changement de voie dangereux</li> <li>2. Freinage inutile</li> <li>3. Réduire les risques de cut-in agressifs</li> </ol>	<p><b>Matériel :</b></p> <p>1 2 : Données naturalistiques de conduite 3 : EDA (1 cas)</p> <p><b>Limites :</b></p> <p>1 2 : Nombre réduit de conducteurs 3 : Analyse d’un seul cas EDA et risque de mauvaise acceptabilité</p>

### Recommandations pour les changements de voies sur autoroute

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lorsque le VA décide de réaliser un changement de voie sur une route à voies multiples, le VA doit être en mesure de détecter suffisamment tôt les 2RMs qui réalisent une remontée de file</li> <li>2. Lorsqu'un VA effectue un changement de voie, il devra adapter sa vitesse pour qu'elle soit supérieure ou égale à celle du véhicule devant lequel il s'insère et laisser un temps inter-véhiculaire de 2 secondes avec ce véhicule</li> </ol>	
<p><b>Pourquoi :</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Risque de choc fronto-arrière ou de changement de voie dangereux</li> <li>2. Freinage inutile</li> <li>3. Réduire les risques de cut-in agressifs</li> </ol>	<p><b>Matériel :</b></p> <p>1 2 : Données naturalistiques de conduite 2 : EDA (1 cas)</p> <p><b>Limites :</b></p> <p>1 2 : Nombre réduit de conducteurs et avis d'expert</p>

### Recommandations pour l'adaptation du VA au contexte (2/2)

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Le VA doit adapter sa dynamique, en fonction du contexte d'infrastructure, de la dynamique des autres véhicules et de la perception de danger des usagers vulnérables, notamment en cas de freinage ou de manœuvre d'arrêt</li> <li>2. Le VA doit adapter sa cinématique de freinage en amont des carrefours en fonction du régime de priorité. En présence d'un stop (arrêt certain) le VA doit freiner tardivement pour éviter de surprendre l'usager qui le suit (2RM ou VL)</li> <li>3. Le VA doit éviter les freinages brusques lorsqu'il est suivi par une trottinette</li> </ol>	 
<p><b>Pourquoi :</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Etre prévisible pour les autres usagers</li> <li>2. Pour réduire les risques de choc arrière</li> <li>3. La décélération maximale est 2 fois plus faible qu'une voiture du fait de la petite roue et de la hauteur du centre de gravité</li> </ol>	<p><b>Matériel :</b></p> <p>1 2 : Données naturalistiques de conduite 3 : Avis d'expert</p> <p><b>Limites :</b></p> <p>1 2 : Nombre réduit de conducteurs</p>

## Recommandations sans consensus scientifique : Mimétisme vs Spécifique

Si un consensus a émergé sur la nécessité pour les VA d'adopter un fonctionnement prévisible et reproductible (i.e. même situation = même action dans le cas des situations hors accident), cela n'est pas le cas du comportement idéal que celui-ci devrait adopter.

En effet, si certains experts prônent un comportement spécifique, qui pourrait notamment être protecteur du VA en termes de sécurité routière, c.à.d. respectant toujours le code de la route et fonctionnant avec d'importantes marges de sécurité, d'autres souhaiteraient un comportement plus proche des comportements observés chez les humains. Cela aurait l'intérêt de rendre le comportement des VA plus « naturel » pour les conducteurs humains, et donc plus prévisibles car mieux compris.

Néanmoins, un VA peut signaler son comportement « inhabituel » en se rendant facilement identifiable par les autres usagers. Cela permettra à ce dernier d'adopter un comportement spécifique, avec un risque d'incompréhension moindre de la part des autres usagers. Néanmoins, cela passe aussi par une formation des conducteurs humains à l'apprentissage de ce comportement spécifique. A mesure que les taux de pénétration du VA augmenteront, les conducteurs humains seront d'une part moins nombreux, et d'autre part mieux entraînés à anticiper le comportement spécifique des VA.

## VII- Bibliographie

1. Akçelik, R., & Besley, M. (2001). Acceleration and deceleration models. Présenté à 23rd Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR 2001), Monash University, Melbourne, Australia, 10-12 December 2001.
2. DELIGIANNI, S.P. ... et al, 2017. Analyzing and modelling drivers' deceleration behaviour from normal driving. *Transportation Research Record*, 2663, pp.134-141.
3. Biever W, Angell L, Seaman S. Automated Driving System Collisions: Early Lessons. *Human Factors*. 2020;62(2):249-259. doi:10.1177/0018720819872034
4. Favarò, F. M., Nader, N., Eurich, S. O., Tripp, M., & Varadaraju, N. (2017). Examining accident reports involving autonomous vehicles in California. *PLOS ONE*, 12(9), e0184952. <https://doi.org/10/gbw9sr>
5. Pokorny, Petr, Belma Skender, Torkel Bjørnskau, et Espen Johnsson. « Performance of automated shuttles at signalized intersections : Video analyses of three intersections in Rådhusgata in Oslo centre ». TØI-rapport. Oslo, Norway: Tøi, janvier 2021. <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=55332>.
6. Wang, S., & Li, Z. (2019). Exploring the mechanism of crashes with automated vehicles using statistical modeling approaches. *PLoS ONE*, 14(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214550>
7. Wang, J., Dixon, K., Li, H., & Ogle, J. (2005). Normal deceleration behavior of passenger vehicles at stop sign-controlled intersections evaluated with in-vehicle global positioning system data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1937, 120-127. <https://doi.org/10.3141/1937-17>
8. Meng, X., & Cassandras, C. G. (2018). Optimal control of autonomous vehicles approaching a traffic light. arXiv:1802.09600 [eess]. Consulté à l'adresse <http://arxiv.org/abs/1802.09600>

