



HAL
open science

Voies réservées au covoiturage : vers l'évaluation de la performance

Mathis Boukhellouf

► **To cite this version:**

Mathis Boukhellouf. Voies réservées au covoiturage : vers l'évaluation de la performance. Infrastructures de transport. École Nationale des Travaux Publics de l'État [ENTPE], 2024. Français. NNT : 2024ENTP0004 . tel-04735709

HAL Id: tel-04735709

<https://theses.hal.science/tel-04735709v1>

Submitted on 14 Oct 2024

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

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

Thèse de doctorat

de l'École nationale des travaux publics de l'État membre de l'Université de Lyon

École doctorale n°162
Mécanique, Énergétique, Génie civil et Acoustique

Discipline du doctorat : ingénierie de la mobilité et des réseaux

soutenue le 14 mars 2024 à l'ENTPE, par

Mathis Boukhellouf
ingénieur des TPE

Voies réservées au covoiturage : vers l'évaluation de la performance

devant le jury composé de :

Ludovic Leclercq	Directeur de recherche, HDR	ENTPE / UGE	Président du jury
Romain Billot	Professeur, HDR	IMT Atlantique	Rapporteur
Jérôme Härrri	Professeur, docteur	EURECOM	Rapporteur
Estelle Chevallier	Ingénieure en chef des PEF, docteure	DGITM	Examinatrice
Nicolas Chiabaut	Ingénieur divisionnaire des TPE, HDR	Département de la Haute-Savoie	Directeur de thèse
Christine Buisson	Directrice de recherche, HDR	ENTPE / UGE	Co-directrice de thèse

*À ma grand-mère,
À mes parents,
À ma sœur,
À mon frère.*

Abstract

In promoting shared mobility, legislation in France allows, since 2020, for experiments with high-occupancy vehicle lanes. Their deployment is one of the levers used to develop short-distance carpooling daily. This thesis develops tools for assessing the performance of these lanes on urban freeways, which are the main target of this experimental deployment. It thus proposes analytical methods in addition to simulation methods. Based on data obtained in a real-life situation, these methods aim to determine the time spent by carpoolers and solo drivers for different traffic demand and supply conditions and various accompanying measures provided for and permitted by the new regulations. In this way, it is possible to define the traffic configurations in which time savings for carpoolers, compared to solo drivers and to the pre-deployment situation, are guaranteed. These gains are essential to ensure credibility and relevance to trigger a modal shift towards shared mobility on major freeways.

Keywords: HOV lanes, carpooling, modal shift, traffic analytical modeling, traffic microscopic simulation, capacity drop, travel time, assessment.

Résumé

Dans un contexte de promotion des mobilités partagées, la législation permet, depuis 2020 en France, de mener des expérimentations de voies réservées aux véhicules à deux occupants ou plus. C'est l'un des leviers utilisés pour développer le covoiturage courte distance au quotidien. La thèse développe des outils d'évaluation de la performance de ces voies réservées sur des autoroutes urbaines, qui sont la principale cible de ce déploiement expérimental. Pour cela, des méthodes analytiques sont proposées, en complément des méthodes de simulation. À partir de données obtenues dans un cas réel, la finalité de ces méthodes est de déterminer les temps passés par les covoitureurs et les autosolistes, pour différentes conditions de demande et d'offre en trafic, ainsi que pour différentes mesures d'accompagnement prévues et permises par la réglementation. Ainsi, on peut définir les configurations de trafic pour lesquelles le gain de temps pour les covoitureurs, à la fois par rapport aux autosolistes et par rapport à la situation précédant le déploiement, est assuré. Ces gains sont un gage important de crédibilité et de pertinence afin d'enclencher, sur les principaux axes routiers, un report modal vers les mobilités partagées.

Mots-clé : voies réservées, covoiturage, report modal, modélisation analytique du trafic, simulation microscopique du trafic, chute de capacité, temps de parcours, évaluation.

Remerciements

Avant tout, je prie les personnes que j'aurais pu oublier le long des pages qui vont suivre de bien vouloir m'excuser.

Je remercie tout d'abord mon directeur de thèse et ma co-directrice de thèse, Nicolas Chiabaut et Christine Buisson. Nicolas, merci d'avoir proposé un sujet de thèse qui m'avait d'emblée très intéressé car mêlant actualité technique, évolution des comportements de mobilité et modélisation. Merci d'avoir continué à suivre l'avancée de mes travaux après ton départ du laboratoire. Christine, merci tout d'abord d'avoir accepté de reprendre le flambeau. Merci aussi pour ta disponibilité, ton dynamisme, tes précieux apports méthodologiques et tes conseils d'amélioration qui me seront utiles pour la suite de ma carrière. Je retiendrai ta capacité à faire des analogies pertinentes et ta légendaire pédagogie, qui ne sont pas usurpées.

Je remercie sincèrement Romain Billot et Jérôme Härrri d'avoir accepté de rapporter mon manuscrit de thèse et pour leurs commentaires constructifs à cet égard. Je remercie tout aussi sincèrement Estelle Chevallier et Ludovic Leclercq d'avoir accepté de participer au jury. Merci à vous quatre pour le temps consacré à l'évaluation de mes travaux.

Mes travaux n'auraient pas pu aboutir sans l'aide technique de certaines personnes. J'ai ainsi eu le plaisir d'interroger Thomas Courbon, Christophe Desnouailles, Pascal Glasson, François Jeanjean, Mathieu Luzerne et Pierre Soulard, que je remercie tous infiniment pour leur temps, leur coopération et le partage de leur expérience et de certains documents. En plus d'avoir été très intéressants, ces entretiens m'auront permis d'enrichir considérablement mes derniers travaux ainsi, plus globalement, que ce manuscrit de thèse. Je remercie aussi Marie Cannonge, Luc Charansonney, Guillaume Rognon et Sandrine Rousic pour m'avoir mis en contact avec certaines des personnes interrogées.

Plusieurs plateformes de simulation ont été utilisées pendant cette thèse, et je remercie Aimsun, en particulier Tamara Djukic, de m'avoir mis à disposition une licence de leur logiciel de simulation.

Enfin, pour les données et documents qu'ils et elle m'ont mis à disposition, je remercie très chaleureusement Aurélien Clairais, Noémie Colin et Frédéric Murard.

Je n'aurais sans doute pas pris la direction d'une formation doctorale sans que mon stage de recherche du printemps-été 2019 ne m'ait convaincu que c'était la voie vers laquelle je voulais poursuivre à la fin de mon cycle ingénieur. À l'Universitat Politècnica de Catalunya, j'adresse donc un grand *moltes gràcies* à Francesc Soriguera pour son accompagnement et son aide dans ma découverte de la recherche scientifique, qui auront été déterminants.

Je suis extrêmement reconnaissant envers mon employeur, le Ministère de la Transition écologique, d'avoir accepté, via la commission d'accompagnement du doctorant ITPE de janvier 2020, ma candidature à une formation doctorale et ainsi de m'avoir accordé sa confiance pour mener ce projet à bien. J'ai acquis, à travers cette formation par la recherche, des compétences scientifiques, techniques et transversales que je n'aurais pas pu autant

développer sur un poste en primo-affectation. Je regrette cependant l'irrespect et l'opacité dont fait preuve la Direction des ressources humaines envers les doctorants ITPE par rapport aux autres ITPE primo-sortants, que ce soit en termes d'égalité de traitement ou de délai de réponse à des instants cruciaux du déroulé de la thèse ; comme si le doctorat était un sous-poste. Cela n'a pas aidé à gagner en sérénité le long d'un parcours déjà bien sinueux.

J'ai eu la chance de réaliser ma thèse au LICIT-Éco7, entouré de collègues qui ont contribué à une ambiance de travail toujours agréable et apaisée.

Je ne peux pas commencer sans remercier mon complice du bureau D009 puis D122a, Alexandre. La thèse aura réparé l'erreur de ne pas vraiment nous être croisés pendant le cycle ingénieur. Il me faudrait un livre entier pour raconter tout ce que tu m'as apporté pendant ces trois années. Merci principalement pour ton soutien sans faille, notamment dans les moments où je manquais de lucidité dans mon travail, pour ces moments fréquents de rire et de camaraderie, et pour être la preuve que vouloir, c'est pouvoir. On aura commencé ensemble et on sera allés au bout de la thèse ensemble, et je suis heureux d'avoir partagé ce parcours avec toi. Si d'aventure la Coupe d'Europe revenait un jour à l'Abbé-Deschamps, tu seras bien sûr la première personne que j'inviterai. Embrasse ta petite famille.

En plus de m'avoir fait l'honneur de présider de mon jury de thèse, je suis très reconnaissant envers Ludovic pour sa gestion en tant que directeur du laboratoire. Merci infiniment pour ton aide et ta confiance à des moments cruciaux du déroulé de ma thèse, qui m'ont sans aucun doute permis d'en parvenir sereinement à bout. Je compte sur toi pour garnir chaque tiroir du labo d'un exemplaire de *Comprendre le trafic routier 2* lorsqu'il sera publié, sans quoi tu seras radié de la secte des traficiens!

J'aimerais adresser un *énorme* remerciement à Sonia, notre gestionnaire administrative. Je n'oublierai jamais ta joie de vivre, ton attention et ton soutien, qui m'auront donné beaucoup de courage et de détermination, notamment dans les périodes difficiles. Je te remercie aussi pour ton aide à toute épreuve pour résoudre les questions de logistique. Je souhaite sincèrement à quiconque d'avoir à travailler avec une personne comme toi. Notre complicité me manquera énormément.

Mes travaux de thèse n'auraient pas pu aboutir sans l'aide très précieuse de Cécile. Merci énormément pour le temps certain que tu as consacré à déboguer SymuVia pour que je puisse réaliser mes simulations. Je t'en suis extrêmement reconnaissant.

La vie du labo aurait été moins dynamique sans ses doctorantes et doctorants. Mélanie, merci pour tous ces instants de soutien mutuel et pour ton écoute attentive, qui ont toujours participé à entretenir ma motivation. Louis, merci pour tous les bons moments passés ensemble, notamment à Louvain. Je remercie aussi celles et ceux qui ont commencé la thèse avant moi, et qui auront été des exemples à suivre : Anna – merci pour nos discussions du midi dans une école bien trop vide pendant la crise sanitaire –, Carlos, Cyril, Élise et Loïc. Je n'oublie évidemment pas Manon. Ton écoute, ton soutien et tes conseils auront été précieux. Je te souhaite la plus belle des carrières académiques, tu le mérites. Je souhaite enfin bon courage à celles et ceux à qui il reste encore un peu de chemin à parcourir. Merci Thibault d'avoir amené ta bonne humeur quotidienne dans le bureau D122a, et aussi de m'avoir fait découvrir le kouign-amann. Merci à Éléonore, Hugues, Maryia et Romain pour le soutien et la tranquillité qu'ils amenaient lors des moments – trop peu fréquents à mon goût! – partagés ensemble. C'est bientôt à votre tour. Enfin, merci à Max et Nicolas qui ont amené leur très agréable fraîcheur et à qui je souhaite le meilleur tout au long du chemin qu'ils ont commencé à emprunter.

Je tiens enfin à remercier l'ensemble des membres passés par le labo pour tous ces instants de partage et d'entraide. Anne-Christine, merci pour ton aide, pour tes recettes et pour ces discussions toujours très intéressantes en parallèle des réunions de labo. Bahman, je te promets de revoir ma propre échelle de notation et ma notion de moyenne, surtout

lorsqu'il s'agit des plats servis au RU. Christophe, merci pour ton bon esprit et pour tes retours toujours pertinents sur mes présentations. Delphine et Mina, merci pour votre appréciable gentillesse et pour votre soutien. *Dottore* Michele, merci pour tes conseils qui m'ont aidé à prendre du recul sur mon organisation et mes travaux. Sylvain, merci pour la sérénité que tu m'as apportée. Je n'oublie pas non plus Ali, Andrés, Angelo, Bruno, Clément, Colette, Fayçal, Florian, François, Kinjal, Marwan, Mehdi, Pierre, Pierre-Antoine, Ruiwei, Serge et Silvia.

La fin de la thèse correspond à la fin d'une période de plus de six ans et demi au sein de l'ENTPE. J'y ai énormément appris, que ce soit au niveau associatif, scientifique et technique, bien sûr, mais aussi sur moi-même et mes vocations, et ce bien plus que je n'aurais pu l'imaginer avant d'entrer dans cette formidable maison. En particulier, j'en sors avec la grande fierté et l'honneur de servir, à mon échelle et selon mes capacités, l'intérêt général. J'y ai aussi rencontré des personnes qui m'ont énormément soutenu pendant la thèse : la solidarité des TPE n'est pas à démontrer.

C'est évidemment les camarades de ma promotion, la 65, que j'aimerais d'abord remercier. Et c'est évidemment Oriane que je remercie en premier. Merci pour ta précieuse amitié, pour ton soutien considérable et pour ces rires partagés, même à distance. Je suis heureux que l'on ait pu continuer à nous raconter nos histoires depuis tout ce temps. Qui sait qu'une voie réservée soit un jour déployée le long du domaine public maritime de la Haute-Corse... Quoiqu'il en soit, comme l'aurait dit un certain J.-P. : *muito obrigado menina*. Je remercie Anaëlle, Elsa, Estelle et Léa d'avoir régulièrement suivi l'avancée de mes travaux et pour le plaisir d'avoir pu vous recroiser de temps en temps. Pour notre entraide et le soutien, je remercie mes camarades doctorants, notamment Gersende, Jean, Jean et Marie-Sarah. Merci enfin au reste de la *team* lyonnaise, Alexandre, Astrid, Béline, Margaux, Marie, Nina et Yann.

Parmi les autres promotions que j'ai croisé, ma gratitude va, pour leur aide précédant mon passage devant la commission du doctorant ITPE, à Maria et Mélanie. J'adresse aussi un remerciement très spécial à Coralie et Louise, sans oublier Anthony. Je remercie aussi, parmi les promotions entrées à l'école pendant ma thèse, Arthur, Flore, Lucas, Olivier, Pierre, Sophie, Yann et Yohanân. Enfin, merci aux doctorants Amélie, Anaëlle, Anouk, Aurélie, Benjamin, Benoît, Émile, Félicien, Mathilde, Maxime, Mélissandre, ainsi qu'à mon camarade de dimar – et pas que! – Benjamin. Bon courage pour la fin de vos thèses respectives.

Devenir doctorant à l'ENTPE, c'est un peu passer du côté obscur, celui « de l'administration », comme on le nommait improprement lorsqu'on était étudiants. Parmi le personnel de cette belle école, je remercie donc Gilles, qui me fera l'honneur d'imprimer ce manuscrit, ce qui change par rapport aux numéros du *Rôle des Turnes*! Merci aussi à Angéline, Antonin, Delphine, Emmanuel, Henry, Jean, Jérôme, Joachim, Laurence, Laurent, Mariam, Olivier, Oriane, Quentin et Shams pour leur soutien et leur aide. Merci enfin, pour leur bonne humeur et leurs sourires quotidiens, à Djamila, Mohamed et Sabah, mais aussi aux hôtesse d'accueil, Leïla et Virginie puis Lou-Anne et Magalie.

Je dois remercier Jacques Perrin-Fayolle et feu le Ministère de l'Équipement d'avoir pensé, lors de la construction du campus de l'ENTPE, à l'aménagement de toutes ces infrastructures sportives. Dieu sait si les salles de sport et la piscine ont considérablement contribué à mes bien-être psychique et physique, si chers à tout thésard. Je remercie Fabien, Georges, Stéphane, Van et l'incroyable duo que forment Gilbert et Ramzy. Je te remercie aussi très chaleureusement, Karine, pour nos séances bien sûr, mais aussi pour ton solide et important soutien!

Merci à la Petite Boulangerie d'avoir sauvé tant de repas du midi les jours où le RU était fermé.

Enfin, pendant toutes ces années, j'ai régulièrement pu compter sur l'aide et le soutien de Jean-Pierre Fidelin, que je tiens tout particulièrement à remercier.

La fin de la thèse signant officiellement la fin de mon parcours scolaire, c'est la moindre des choses que de rendre hommage aux professeurs qui m'ont tiré vers le haut et permis, assurément, d'en arriver jusqu'ici :

- à l'école du Petit-Vaugirard, merci à Évelyne Cros d'avoir toujours cherché à piquer notre curiosité;
- au collège rue Pierre, merci à Virginie Cadici pour toute la confiance qu'elle a su m'insuffler;
- au lycée André-Malraux, autre endroit cher à mon cœur, merci à Mikael Pourcher pour la transmission de méthodes qui me servent encore aujourd'hui, et pour m'avoir définitivement convaincu qu'on pouvait aller loin si on en était motivé. Merci aussi à Frédérique Morin dont les cours sur l'aménagement du territoire m'ont passionné, ce qui a certainement joué dans mon choix d'intégrer l'ENTPE. Pour une historienne, je trouve ça très fort. Merci enfin à Claire Barrao-Farle, à *la loca* Isabelle Malaquias et à Raffaella Pappada qui m'ont toutes énormément apporté;
- au lycée Saint-Louis, un grand merci à Johann Sée dont la pédagogie et la manière d'aborder et de transmettre la physique m'ont marqué à jamais;
- au lycée du Parc, ma reconnaissance éternelle va à Denis Jourdan, Jean-Marc Pamiès et Claire Vial – merci d'avoir assisté à ma soutenance! – pour m'avoir définitivement réconcilié avec les sciences.

À Montereau et partout à travers la France et le monde, je remercie ma famille pour son soutien indéfectible et pour s'être déplacée en nombre pour assister à ma soutenance.

Je remercie mes oncles et tantes, en particulier Djamila et Dominique, Djamila et Olivier, mais aussi Denor, Ferouze, Hrildja, Nadia, Omar, ainsi que Salim. Je remercie tout spécialement Aïcha, qui a su m'aider à retrouver un état d'esprit positif lors des moments les plus difficiles.

Je remercie aussi mes cousines et cousins, en particulier Camille, Célia, Kenza, Lina, Mehdi, Selyan, ainsi que Yannis. Merci à Hamid et Stéphanie ainsi qu'à Mehdi et Samira qui, pendant mon parcours, m'ont apporté leur aide quand j'en ai eu besoin.

Du fond du cœur, merci à *jida* Fatima, pour tout ce que tu m'as apporté. Ma réussite, c'est aussi la tienne. J'ai une grande pensée pour mes autres grands-parents et pour ma tante Baya, qui auraient été fiers.

Merci à ma petite sœur, Heïlana, pour ton soutien et tes encouragements importants au quotidien. Merci pour ta capacité à me remonter aussi facilement le moral, notamment par ton humour. Ta présence m'a été extrêmement précieuse.

Merci à mon petit frère, Maxène, pour tout ce que tu m'apprends jour après jour. Merci de me faire garder la tête froide en – presque – toute circonstance. Ta présence m'a aussi été extrêmement précieuse.

Mes derniers remerciements vont à mes parents, Badis et Souriya. Je devrais écrire des pages et des pages pour transcrire fidèlement tout ce que vous m'avez apporté... Je me contenterai donc, ici, de vous remercier pour m'avoir accompagné, soutenu et encouragé, en toute circonstance et sans la moindre réserve, depuis le début. Merci pour m'avoir partagé votre vision du monde et de la société, qui m'a aidé à comprendre bien des situations, ainsi qu'à faire les choix qui me convenaient. Il m'a aussi fallu faire preuve de beaucoup de résilience et de persévérance pour parvenir au bout de ce parcours, et je sais de qui je tiens ces qualités. Je mesure la chance et l'honneur de vous avoir à mes côtés. Merci pour *tout*.

Vaulx-en-Velin,
15 avril 2024.

Table des matières

Liste des figures	xix
Liste des tableaux	xxiii
Liste des abréviations	xxv
Liste des principales notations	xxvii
Introduction	29
Positionnement	29
Objectifs de la thèse	30
Articulation de la thèse	30
Liste des valorisations	32
I Contexte opérationnel et scientifique	33
1 Déploiement des VR2+ en France : état des lieux opérationnel	35
1.1 La transition écologique et sociale des mobilités du quotidien en France s'appuie sur le covoiturage courte distance	36
1.1.1 Tendre vers la durabilité des mobilités du quotidien	36
1.1.1.1 La nécessité mondiale d'une transition écologique et sociale	36
1.1.1.2 Des mobilités du quotidien encore trop polluantes et inéga-	
litaires en France	37
1.1.2 Un champ d'action : partager sa mobilité du quotidien	40
1.1.2.1 Principes d'une démarche ancrée dans la transition	40
1.1.2.2 Leviers et freins à la pratique des mobilités partagées au	
niveau individuel	41
1.1.2.3 Le covoiturage courte distance gagne récemment en poten-	
tiel, donc en intérêt	42
1.1.3 La réponse législative française pour développer le covoiturage courte	
distance	44
1.2 Les VR2+, infrastructures en appui de la transition des mobilités du quotidien	46
1.2.1 Principes et objectifs d'une réservation de voie	46
1.2.1.1 Des principes communs mais des possibilités de déploie-	
ment variées	46
1.2.1.2 Objectifs visés et effets potentiels : de la tactique à la stratégie	49
1.2.2 Principes de mise en œuvre d'une VR2+	50
1.2.2.1 Réglementation des VR2+ françaises	50
1.2.2.2 Principes d'activation et de désactivation	53
1.2.3 Acteurs impliqués et parties prenantes	55

1.2.3.1	Les acteurs et parties prenantes opérationnels dans la réalisation du projet	55
1.2.3.2	Les demandes et les pressions des politiques locaux et des usagers de la route	56
1.3	Du projet de VR2+ à son déploiement et à son suivi à court et à long termes .	57
1.3.1	Préparation du déploiement	57
1.3.1.1	Évaluation <i>a priori</i> : opportunité et pré-faisabilité	57
1.3.1.2	Travaux à prévoir, leurs coûts et leur durée	59
1.3.2	Évaluation <i>a posteriori</i> de la VR2+ et premiers retours d'expérience .	60
1.3.2.1	Principes de l'évaluation <i>a posteriori</i> : temporalité, indicateurs, préparation	60
1.3.2.2	Premiers retours d'expérience en France	61
1.3.2.3	Un dispositif pas toujours compris mais, surtout, pas respecté	62
1.3.3	Planification locale et synergie avec les infrastructures de services pour favoriser le report modal	63
1.4	Conclusion du chapitre	65
2	Éléments de théorie du trafic	67
2.1	Du véhicule au trafic routier : vers la modélisation analytique de l'écoulement	67
2.1.1	Description à l'échelle microscopique	67
2.1.1.1	Les modèles de poursuite pour décrire les mouvements longitudinaux	68
2.1.1.2	Les modèles de changement de voie pour décrire les mouvements latéraux	69
2.1.2	Description à l'échelle macroscopique	70
2.1.2.1	Caractérisation analytique de l'écoulement du trafic	70
2.1.2.2	Extension aux discontinuités autoroutières	72
2.1.2.2.1	Modélisation des divergents autoroutiers	72
2.1.2.2.2	Modélisation des convergents autoroutiers	73
2.2	Identifier, reproduire, valider : l'approche empirique et la simulation	75
2.2.1	Observation et utilisation de données de terrain pour l'approche empirique	75
2.2.2	Utilisation des outils de simulation numérique	76
2.2.2.1	Fonctionnement et positionnement de l'utilisation de ces outils	76
2.2.2.2	Description des outils de simulation microscopique utilisés dans cette thèse	77
2.2.2.2.1	SymuVia	77
2.2.2.2.2	Aimsun	78
2.2.2.2.3	SUMO	79
II	Étude des phénomènes aux interfaces des VR2+	81
3	Reproduction du fonctionnement des divergents et convergents par les outils de simulation microscopique	83
3.1	Intérêt de l'étude des conditions de trafic aux interfaces d'une VR2+	83
3.1.1	Présentation des interfaces des VR2+	83
3.1.2	Vers une modélisation analytique de la chute de capacité au droit des interfaces	84

3.1.3	Vers l'utilisation des outils de simulation microscopique pour quantifier les phénomènes aux interfaces	85
3.1.3.1	De l'importance de reproduire les conditions de trafic aux interfaces	85
3.1.3.2	Vers une démarche de comparaison croisée des outils	86
3.2	Préparation de la comparaison croisée des outils de simulation	88
3.2.1	Le besoin d'une base macroscopique commune aux différents outils	88
3.2.2	Méthodologie de la comparaison croisée	89
3.2.2.1	Génération des résultats liés au fonctionnement de divergent	89
3.2.2.2	Génération des résultats liés au fonctionnement de convergent	90
3.3	Résultats de la comparaison croisée	91
3.3.1	Génération des véhicules : distribution des temps intervéhiculaires en conditions fluides	91
3.3.2	Résultats liés au fonctionnement de divergent	92
3.3.3	Résultats liés au fonctionnement de convergent	93
3.3.3.1	Résultats du fonctionnement macroscopique	93
3.3.3.2	Distribution des positions de changement de voie sur un convergent étendu	97
3.4	Conclusion et discussion	99
4	Modélisation analytique de l'écoulement du trafic induit par le déploiement d'une VR2+	101
4.1	Modélisation analytique de la capacité de l'interface amont	101
4.1.1	Approche et méthodologie choisies pour modéliser la capacité de l'interface amont	101
4.1.2	Modélisation analytique du fonctionnement des zones d'entrecroisement	103
4.1.2.1	Modélisation analytique de la chute de capacité au droit d'un convergent	104
4.1.2.2	Modélisation analytique de la chute de capacité au droit d'un divergent	105
4.1.2.3	Combinaison des deux fonctionnements pour la modélisation analytique du fonctionnement d'une zone d'entrecroisement	106
4.1.3	Adaptation à la modélisation de l'interface amont des VR2+	107
4.1.3.1	Les principes et hypothèses adoptés et leurs conséquences	107
4.1.3.2	Résultats obtenus et comparaison à la simulation	109
4.1.4	Discussion et ouverture	112
4.1.4.1	Raffinement du modèle analytique de la capacité de l'interface amont	112
4.1.4.2	Vers une modélisation analytique de l'interface aval et des interfaces aux discontinuités	114
4.2	Dynamique du trafic sur une section où est déployée une VR2+	114
4.2.1	Les domaines de fonctionnement d'une VR2+	115
4.2.1.1	Le domaine d'emploi, un ensemble de conditions suffisantes pour assurer la performance d'une VR2+	115
4.2.1.2	Les autres domaines de fonctionnement d'une VR2+	117
4.2.2	Dynamique liée aux domaines de fonctionnement dans un cas simple de congestion de demande	120
4.2.2.1	Méthode utilisée et hypothèses formulées	120

4.2.2.2	Dynamique du trafic dans les différents domaines de fonctionnement	120
4.2.2.3	Indicateurs de performance génériques retenus	121
4.2.2.3.1	Position maximale de la remontée de congestion	122
4.2.2.3.2	Temps total perdu minimal par mode	122
4.2.3	Discussion et ouverture	123
4.2.3.1	La performance d'une VR2+ dépend davantage des objectifs opérationnels que du respect absolu du domaine d'emploi	124
4.2.3.2	Vers l'utilisation d'outils de simulation dynamique	125
III	Vers l'évaluation générique de la performance tactique d'une VR2+	127
5	Méthode d'évaluation de la performance d'une VR2+ dans le contexte opérationnel français	129
5.1	Catégorisation et impacts des stratégies d'AVLA eulériennes sur les autoroutes urbaines	130
5.1.1	Principe général et catégorisations	130
5.1.1.1	Principe général de ces stratégies	130
5.1.1.2	Catégorisation par méthode de déclenchement	130
5.1.1.3	Catégorisation par objectif opérationnel	131
5.1.2	Impacts sur les conditions de circulation	133
5.1.2.1	Homogénéiser le trafic en conditions fluides pour augmenter l'offre de l'infrastructure	133
5.1.2.2	Filter le débit pour ne pas activer ou alimenter un goulot d'étranglement en aval	135
5.1.3	Impacts sur la sécurité routière	135
5.1.3.1	De la difficulté à quantifier l'insécurité routière	135
5.1.3.2	Effets observés d'un AVLA sur la fréquence des accidents et effets possiblement atteignables	136
5.1.4	Impacts sur la qualité de l'air	137
5.1.4.1	Mesurer les émissions polluantes des véhicules	137
5.1.4.2	Effets d'un AVLA sur les émissions polluantes	137
5.1.5	Bilan de l'étude bibliographique et directions induites pour la méthode d'évaluation	138
5.2	Principes et développement de la méthode d'évaluation proposée	139
5.2.1	Fondements d'une évaluation générique : la performance mesurée au prisme tactique	139
5.2.2	Les trois dimensions de l'évaluation	140
5.2.2.1	La VLA : une dimension opérationnelle réglementaire	140
5.2.2.2	La modalité d'activation et de désactivation : une dimension opérationnelle de gestion	141
5.2.2.3	La répartition modale initiale : une dimension de circulation	142
5.2.2.4	La variabilité inter-quotidienne des conditions de trafic : entre profondeur de l'évaluation et définition des variables d'entrée du système à évaluer	142
5.2.3	Quantifier la performance du système évalué	143
5.2.4	Récapitulation	143
6	Application de la méthode d'évaluation à un cas réaliste simulé	145
6.1	Construction du modèle en simulation utilisé pour l'application de la méthode	146

6.1.1	Choix de l'outil de simulation dynamique et microscopique pour construire le modèle	146
6.1.2	Du terrain au synoptique	146
6.1.3	Données disponibles et leur utilisation	148
6.1.3.1	S'assurer d'une matrice origine-destination cohérente	148
6.1.3.2	Caractériser l'écoulement du trafic	150
6.1.3.3	Choix des jours retenus et définition des offres en aval	152
6.1.4	Scénarios considérés au regard de la méthode d'évaluation	152
6.1.4.1	Considérations liées à l'utilisation de la simulation	154
6.1.4.2	Construction des modalités d'activation et de désactivation	154
6.1.4.3	Récapitulation	156
6.1.5	Calage des paramètres pour s'assurer d'un écoulement cohérent	157
6.1.5.1	Caler et valider : démarche entreprise pour ces étapes indispensables	157
6.1.5.2	Mise en œuvre de la méthode de calage et de validation	158
6.2	Évaluation du système simulé	160
6.2.1	Résultats de l'évaluation générique	160
6.2.1.1	Maîtrise de la congestion	160
6.2.1.2	Effectivité du déploiement pour la MAP	161
6.2.1.3	Crédibilité du déploiement	163
6.2.1.4	Pertinence du déploiement	165
6.2.1.5	Conclusion et ouverture	165
6.2.2	Vers une vision prospective	168
6.2.2.1	Positionnement du scénario proposé	168
6.2.2.2	Définition du scénario et des variables utilisées	169
6.2.2.3	Résultats pour le système simulé	171
6.3	Conclusion du chapitre	173
Conclusion		175
	Principaux résultats	175
	Perspectives	177
Bibliographie		CLXXXI
Annexes		CCI
A	Questionnaire utilisé pour mener les entretiens	CCI
B	Synoptiques des VR2+ ayant fait l'objet d'un entretien	CCIII

Liste des figures

1.1	Armature des aires urbaines d'attraction de la France métropolitaine au 1 ^{er} janvier 2020. Source : adapté du travail de l'utilisateur Roland45 de Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0	39
1.2	Schéma de l'écosystème local attendu, à moyen et long termes, du covoiturage du quotidien en agglomération urbaine après la promulgation de la LOM . . .	45
1.3	Conditions de trafic sur l'autoroute I-5 dans l'État de Washington (États-Unis) en 2017, où une VR2+ est déployée sur la voie rapide. Source : photo prise par l'utilisateur SounderBruce de Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0	47
1.4	Panneau de signalisation utilisé à titre expérimental pour indiquer une voie réservée en France, faisant figurer une macle. Source : arrêté du 24 août 2020 relatif à l'expérimentation d'une signalisation relative aux voies de circulation réservées à certaines catégories de véhicules sur certains axes	48
1.5	Illustration de l'AVLA préalable au déploiement d'une VR2+ à partir d'une autoroute limitée à 110 km/h : a) situation de départ b) résultat de la stratégie. La VR2+ sera déployée sur les 3 ^e et 4 ^e sections et limitée à 50 km/h	53
1.6	Report modal vers des mobilités quotidiennes partagées sur le territoire français : enjeux du développement du covoiturage courte distance, liés à ceux du déploiement des VR2+. Les proportions modales initiales et attendues sont fixées à titre purement illustratif et arbitraire	65
2.1	Représentation schématique de trajectoires fictives de trois véhicules permettant d'identifier graphiquement les principales variables microscopiques . . .	68
2.2	Diagramme fondamental triangulaire pour une route à n voies	71
2.3	Utilisation des CVC en un point donné d'un réseau, illustrée pour le cas d'une congestion simple d'offre	72
2.4	Représentation d'un divergent ponctuel (a) et du diagramme de divergent permettant de visualiser graphiquement les états de trafic (b). Inspiré de (Ancelet et Hans, 2020)	73
2.5	Représentation du convergent sur la voie i	74
2.6	Diagramme de Newell-Daganzo avec trois exemples d'allocation de la demande, pour le cas de base de deux voies convergeant vers une seule voie de capacité $C_i^m = \text{cste} (\lambda_i ; \lambda_j) = q_x$. Inspiré de (Marczak, 2014)	75
3.1	Les trois types d'interface d'une VR2+ et les changements de voie qui y sont effectués : (a) l'interface amont; (b) l'interface aval dans le cas d'une réduction de voie et (c) les interfaces aux discontinuités : (1) bretelle de sortie et (2) bretelle d'entrée	84

3.2	Schématisation d'une zone d'entrecroisement sur une autoroute urbaine et représentation des mouvements d'entrecroisement : en vert, les véhicules passant de la bretelle d'entrée à la section courante; en orange, les véhicules passant de la section courante à la bretelle de sortie. Repris et adapté de (Marczak, 2014)	86
3.3	Comparaison entre les diagrammes fondamentaux simulés et le diagramme fondamental triangulaire	89
3.4	Réseaux utilisés en simulation pour un divergent ponctuel avec une restriction de capacité sur l'une des voies en aval (a) et pour un convergent étendu (b)	90
3.5	Génération des véhicules : comparaison des distributions simulées des temps intervéhiculaires d'entrée avec une distribution théorique exponentielle	92
3.6	Comparaison croisée des diagrammes de divergent simulés	93
3.7	Chronique des vitesses de flot pour une simulation, lorsque (a) les deux voies sont fluides; (b) la voie U est congestionnée et la voie R fluide; (c) les deux voies sont congestionnées	94
3.8	Chronique des débits pour une simulation, lorsque (a) les deux voies sont fluides; (b) la voie U est congestionnée et la voie R fluide; (c) les deux voies sont congestionnées	95
3.9	Débits cumulés associés à la figure 3.8, lorsque (a) les deux voies sont fluides; (b) la voie U est congestionnée et la voie R fluide; (c) les deux voies sont congestionnées	95
3.10	Comparaison croisée du diagramme de Newell-Daganzo. Les lignes grises correspondent à la fonction de projection de Newell-Daganzo et les traits dorés au modèle de Leclercq et al. (2011)	96
3.11	Trajectoires des véhicules dans la zone du convergent étendu où s'effectuent les insertions lorsque (1) la voie amont est congestionnée et la bretelle est fluide; et (2) les deux voies sont congestionnées	98
3.12	Distribution des positions de changement de voie simulées en amont d'un convergent étendu, lorsque (a) les deux voies sont fluides; (b) la voie U est congestionnée et la voie R fluide; (c) les deux voies sont congestionnées	98
4.1	Évolution de la borne supérieure de la capacité de l'interface amont avec la proportion en VOM, pour une VR2+ et deux VG et pour une capacité théorique par voie de 2000 véh/h	102
4.2	Représentation de la situation du trafic dans une zone d'entrecroisement de longueur L_w avec ses quatre discontinuités : un divergent et un convergent pour chaque tuyau. Adapté de (Marczak, 2014)	103
4.3	Représentation du divergent sur le tuyau i . Adapté de (Marczak, 2014)	105
4.4	Divergent couplé à un convergent. Adapté de (Marczak, 2014)	106
4.5	Schéma récapitulant le fonctionnement pour l'un des tuyaux de la zone d'entrecroisement, par défaut le tuyau i . Inspiré et adapté de (Marczak, 2014)	108
4.6	Du modèle de zone d'entrecroisement (a) au modèle d'interface amont d'une VR2+ (b)	109
4.7	Évolution de la capacité de l'interface amont avec la proportion en VOM, pour les paramètres du tableau 4.1, à partir de trois méthodes : calcul d'une borne supérieure n'intégrant pas l'effet des CVO, calcul d'une borne inférieure l'intégrant, et simulation, avec (1) Aimsun et (2) SymuVia, pour (a) une VR2+ et une VG et (b) une VR2+ et deux VG en aval de l'interface amont	111

4.8	Chute de capacité au niveau de l'interface amont, induite par le modèle analytique développé dans ce chapitre et calculée en comparaison du modèle théorique régi par l'équation 4.1	112
4.9	Représentation schématique d'un convergent multivoies, mettant en évidence les aires de CVO (en rouge) et de CVD (en bleu), pour une route à deux voies. Tiré de (Leclercq <i>et al.</i> , 2016b)	113
4.10	Synoptique schématique d'un déploiement typique d'une VR2+ sur autoroute, surlignant la position des potentielles têtes de bouchon en orange	115
4.11	Domaines de fonctionnement d'une VR2+ pour (a) $\alpha < \alpha^*$, (b) $\alpha > \alpha^*$ et (c) $\alpha = \alpha^*$	118
4.12	Validation de la méthode : diagrammes espace-temps associés aux douze domaines de fonctionnement de VR2+ tels que paramétrés par les tableaux 4.3 et 4.4	124
5.1	Illustration de l'algorithme \mathcal{A} : première et dernière étapes puis activation de la VR2+	132
5.2	Évolution voie par voie du diagramme fondamental en conditions fluides, observée sur l'A7 pour une montée en charge du trafic, sans RDV. Tiré de (Duret <i>et al.</i> , 2012)	134
5.3	Évolution de la capacité de la voie lente en fonction du débit total pour lequel elle est atteinte. Les cercles blancs correspondent à une situation sans régulation, les carrés blancs à une situation avec régulation. Tiré de (Duret <i>et al.</i> , 2012)	134
5.4	Facteurs d'émissions à l'échappement en fonction de la vitesse moyenne pratiquée pour le CO et les NO _x , estimés à partir de la méthode COPERT. Tiré de (André et Brutti-Mairesse, 2015)	138
5.5	Illustration d'une procédure d'activation et de désactivation pour le cas d'une VLA nominale de 110 km/h et d'un AVLA à 50 km/h	140
5.6	Résumé graphique de la méthode générique d'évaluation proposée	143
6.1	Fil directeur du chapitre : de la construction du modèle à son application pour l'évaluation de la VR2+ ainsi simulée	145
6.2	Terrain d'étude pour ce chapitre : l'autoroute A7 entre Saint-Fons et Ternay; l'emprise de la partie étudiée est surlignée en bleu. Source : capture d'écran openstreetmap.org	147
6.3	Synoptique simplifié du terrain d'étude représenté sur la figure 6.2. L'emprise de la VR2+ est signalée en hachures vertes	148
6.4	Positionnement des entrées (préfixe E) et sorties (préfixe S) sur le périmètre élargi, à partir desquelles sont comptés les débits du tableau 6.1. Les points bleus correspondent aux entrées et sorties intéressantes pour le terrain d'étude	149
6.5	Localisation des deux sorties intermédiaires sur le terrain d'étude, à partir desquelles la cohérence de la matrice origine-destination est vérifiée	150
6.6	Chroniques des enveloppes et de la moyenne (en traits pleins), sur les 25 jours de semaine, du débit et du taux d'occupation en période de pointe pour la sortie principale et les entrées du réseau étudié	151
6.7	Histogramme de la distribution journalière, pour les 19 jours retenus, de la moyenne du débit en sortie 0 en congestion	154
6.8	Vers l'établissement des débits opérationnels de la MAP : comparaison journalière du débit à l'entrée 0 et du débit de demande en sortie 0 pour les 14 jours retenus	155

6.9	Adaptations principales de la méthode d'évaluation au terrain reproduit en simulation	156
6.10	Chroniques de la vitesse de flot et du taux d'occupation pour la boucle T2 le (a) 26 septembre 2019 et le (b) 17 octobre 2019. La situation (a) présente une congestion installée, au contraire de la situation (b)	158
6.11	Illustration du comptage des périodes pendant lesquelles les conditions de trafic sont mal simulées	159
6.12	Heure d'activation de la VR2+, pour la MAP, suivant la proportion en VOM et la VLA	161
6.13	Heure de désactivation de la VR2+, pour la MAP, suivant la proportion en VOM et la VLA	162
6.14	Différence relative des retards moyens des VOM par rapport à ceux des VI, suivant la proportion en VOM, la VLA et la modalité	164
6.15	Différence relative des retards moyens des VOM par rapport à la situation de référence, suivant la proportion en VOM, la VLA et la modalité	166
6.16	Différence relative des retards moyens des VI par rapport à la situation de référence, suivant la proportion en VOM, la VLA et la modalité	167
6.17	Évolution de la proportion en VOM en fonction de l'occupation moyenne des VOM et de la proportion en covoitureurs	170
6.18	Différence relative des retards moyens des VOM par rapport à ceux des VI, suivant la proportion en covoitureurs	171
6.19	Différence relative des retards moyens des VOM par rapport à la situation de référence, suivant la proportion en covoitureurs	172
6.20	Différence relative des retards moyens des VI par rapport à la situation de référence, suivant la proportion en covoitureurs	173
B.1	Synoptique simplifié de la VR2+ déployée sur l'A48. Source : https://area-covoiturage.com/	CCIII
B.2	Synoptique des quatre VR2+ déployées sur la M6 et la M7. Source : Métropole de Lyon	CCIV
B.3	Synoptique simplifié lié au projet de VR2+ sur l'A15. Source : DiRIF	CCIV
B.4	Synoptique de la VR2+ déployée sur l'A1, de juillet 2023 à l'automne 2023. Source : DIR Nord	CCV
B.5	Synoptique de la VR2+ déployée sur l'A1, à partir de l'automne 2023. Source : DIR Nord	CCVI

Liste des tableaux

1.1	Synthèse des informations relatives aux VR2+ liées aux entretiens menés pour ce chapitre	36
1.2	Distribution du mode principal de transport au quotidien pour tous les motifs et pour le motif domicile-travail, en France	39
1.3	Classification des voies réservées, sur autoroute, à vision de partage des mobilités, avec des références évoquant chaque possibilité de déploiement	48
1.4	Effets potentiels induits par le déploiement d'une VR2+	51
1.5	Objectifs et points de vigilance des projets de VR2+ liés aux entretiens menés. Tableau obtenu à partir des entretiens et complété à partir de (Guitton, 2022 ; Glasson, 2023)	52
1.6	Coûts globaux et répartition du financement des projets de VR2+ liés aux entretiens	60
3.1	Paramètres macroscopiques attendus pour assurer un écoulement similaire entre les simulateurs	88
3.2	Paramètres microscopiques modifiés dans les outils de simulation	89
3.3	Résultats macroscopiques principaux permettant d'apprécier le fonctionnement de convergent	96
4.1	Valeurs des paramètres utilisés pour générer les résultats	109
4.2	Synthèse des différents domaines de fonctionnement d'une VR2+	119
4.3	Paramètres communs aux différents cas de vérification et leur valeur	123
4.4	Validation de la méthode : calcul des indicateurs pour les douze domaines de fonctionnement	123
5.1	Introduction de l'algorithme \mathcal{A} : notations utilisées et formalisme	131
6.1	Débits moyens (véh/h) entre chaque entrée (lignes) et chaque sortie (colonnes) indiquées dans la figure 6.4 et relatives au périmètre élargi, obtenus après le redressement des données issues de l'enquête minéralogique. Source : DREAL Auvergne – Rhône-Alpes, Neovya	150
6.2	Matrice origine-destination obtenue à partir des résultats redressés de l'enquête minéralogique et restreints au terrain d'étude	150
6.3	Comparaison des proportions des véhicules sortant du réseau aux deux sorties, en période de pointe du matin. Les valeurs obtenues à partir des données boucle sont une moyenne pour les neuf jours retenus pour le calage	150
6.4	Caractéristiques des 25 jours de données à disposition amenant à leur choix, ou non, pour alimenter les scénarios ou le calage du modèle	153
6.5	Heures quotidiennes et moyenne de début et de fin de la congestion, au niveau de la sortie 0, pour les 14 jours retenus	155

6.6	Résultats du calage (vecteur \vec{p}_i^* appliqué à l'ensemble i) et de la validation (vecteur \vec{p}_j^* appliqué à l'ensemble i)	160
6.7	Allongement de la file d'attente maximale suivant la configuration simulée .	161
6.8	Correspondances, pour les cinq situations prospectives simulées, entre proportion en covoitureurs, occupation moyenne de l'ensemble des véhicules et proportion en VOM, obtenues à partir des équations 6.1 et 6.2	171

Liste des abréviations

Sigle	Signification
AOM	Autorité organisatrice de la mobilité
APRR	Autoroutes Paris-Rhin-Rhône
AREA	Autoroutes Rhône et Alpes
AVLA	Abaissement de la vitesse limite autorisée
CCC	Convention citoyenne pour le climat
Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CVD	Changement de voie discrétionnaire
CVO	Changement de voie obligatoire
DGITM	Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités
DIR	Direction interdépartementale des Routes
DiRIF	Direction des Routes d'Île-de-France
DREAL	Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DSR	Délégation à la sécurité routière
FIFO	<i>First in, first out</i> (premier arrivé, premier sorti)
IISR	Instruction interministérielle sur la signalisation routière
LOM	Loi d'orientation des mobilités
LWR	Lighthill, Whitham, Richards
MAP	Modalité adaptative proactive
MOa	Maître (ou maîtrise) d'ouvrage
MSPe	Modalité statique permanente
MSPr	Modalité statique prédéterminée
MTE	Ministère de la Transition écologique
PC	Poste de contrôle
PMV	Panneau à message variable
PNCQ	Plan national du covoiturage du quotidien
RDV	Régulation dynamique des vitesses
RMSE	<i>Root-mean-square error</i>
V(T)FE	Véhicule à (très) faibles émissions
VG	Voie générale
VI	Véhicule individuel
VLA	Vitesse limite autorisée
VOM	Véhicule à occupation multiple
VR2+	Voie réservée aux véhicules contenant au moins deux passagers
VRTC	Voie réservée aux transports en commun
VSA	Voie structurante d'agglomération
ZFE-m	Zone à faibles émissions mobilité

Liste des principales notations

Modélisation macroscopique du trafic routier	Notation	Unité usuelle
Nombre de véhicules	N	véh
Débit	q	véh/h
Densité	k	véh/km
Vitesse du flot	v	km/h
Vitesse libre	u	km/h
Vitesse maximale de remontée de congestion	w	km/h
Densité maximale d'une voie	κ	véh/km
Capacité théorique d'une voie	q_x	véh/h
Nombre de voies	n	
Modélisation microscopique du trafic routier	Notation	Unité usuelle
Vitesse désirée	\tilde{u}	km/h
Longueur d'un véhicule	l	m
Distance intervéhiculaire minimale	g'	m
Temps intervéhiculaire relatif minimal	τ	s
Accélération maximale	a	m/s ²
Différentiel de relaxation	ε	m/s
Modélisation des discontinuités autoroutières	Notation	Unité usuelle
Demande sur le tuyau i	λ_i	véh/h
Débit effectif sur le tuyau i	q_i	véh/h
<i>Modélisation du fonctionnement de divergent</i>		
Proportion de mouvements tournants en amont du tuyau i	β_i	
Capacité du divergent du tuyau i	C_i^d	véh/h
<i>Modélisation du fonctionnement de convergent</i>		
Coefficient de partage de la priorité du convergent du tuyau i	γ_i	
Longueur de la zone d'insertion	L_{ins}	m
Capacité du convergent du tuyau i	C_i^m	véh/h
<i>Modélisation du fonctionnement de zone d'entrecroisement</i>		
Coefficient de partage de la priorité	δ	
Longueur de la zone d'entrecroisement	L_w	m
Capacité de la zone d'entrecroisement	C^w	véh/h

Modélisation des VR2+	Notation	Unité usuelle
Proportion en VOM dans le trafic	α	
Proportion en covoitureurs parmi les personnes transportées	ω	
Nombre de personnes	P	pax
Occupation moyenne	$\bar{\rho}$	pax/véh
Demande amont	Δ	véh/h
Offre aval	Ω	véh/h
Capacité de l'interface amont	Ω_U	véh/h
Nombre de VR2+	n_H	
Nombre de VG	n_G	

Introduction

Positionnement

L'état de la France du début des années 2020 résulte d'importantes transformations économiques et sociales qui travaillent depuis la fin des Trente Glorieuses. Comme l'ont mis en évidence [Fourquet et Cassely \(2021\)](#) en décrivant cette France « d'après », la tertiarisation, notamment, a reconfiguré en profondeur la localisation des activités et accéléré par là même le processus de métropolisation. Cette nouvelle configuration laisse encore plus de côté les « hommes et femmes de la route »¹. Résidant dans les espaces périurbains et ruraux, leur mobilité au quotidien dépend fortement de l'usage de la voiture, faute d'autre solution. Aussi, d'autres personnes utilisent encore au quotidien la voiture par commodité et par réflexe.

Face à ces constats, parmi d'autres, de la place prépondérante de la voiture dans les mobilités quotidiennes, la loi d'orientation des mobilités a été promulguée fin 2019. Elle prévoit, entre autres, le développement de solutions de mobilité quotidiennes innovantes, plus respectueuses de l'environnement et garantissant une meilleure accessibilité afin de désenclaver les territoires isolés. Le covoiturage courte distance, dont l'essor était jusqu'alors vacillant, est l'une de ces solutions. Son développement est accompagné par celui de plateformes en ligne permettant d'appareiller de manière plus souple et flexible les usagers, d'aires multimodales, de lignes de covoiturage ou encore d'incitations financières. Il est aussi accompagné par la conversion, sur les autoroutes urbaines, de certaines voies de circulation en voies réservées aux véhicules à deux occupants ou plus (VR2+), qui sont l'objet d'étude de cette thèse.

Afin de mieux contrôler la congestion, en particulier lors des périodes quotidiennes de pointe, les exploitants d'infrastructures autoroutières peuvent décider d'instaurer une politique de régulation du trafic. Jusqu'ici, la plupart des stratégies opérationnelles mises en place pour y parvenir se sont concentrées sur une modification de l'offre en trafic, par exemple en régulant de manière dynamique la vitesse sur le tronçon concerné par ce problème. Ces stratégies sont des solutions à court terme, alors que des réflexions sur la modification de la demande en trafic, qui sous-entendent un changement des comportements des utilisateurs, amènent à des solutions à long terme. Le déploiement d'une VR2+ est une solution cherchant à agir aux deux horizons temporels. Modifiant l'offre à court terme, elle s'opère par la réservation temporaire ou permanente de la voie rapide au profit des véhicules à occupation multiple (VOM) et, dans certains cas, des véhicules à faibles émissions. En conséquence, l'objectif est de garantir des conditions de trafic fluides pour les usagers de cette voie, la congestion se répercutant alors sur les autres voies où circulent les autosolistes. À long terme, l'enjeu est d'influencer les comportements de mobilité, et par conséquent de changer la demande en transports. En effet, le but des VR2+ est d'inciter les utilisateurs de voitures individuelles à adopter des comportements plus vertueux, c'est-à-dire qu'ils partagent leur mobilité au quotidien afin de limiter le nombre de véhicules en circulation tout en augmentant le nombre de personnes dans chaque véhicule. L'effet escompté est la garantie de temps

1. *ibid.*, p. 121

de parcours compétitifs pour les VOM par rapport aux véhicules individuels, ce qui peut convaincre ces derniers à changer leur comportement vis-à-vis de l'utilisation de la voiture personnelle.

Objectifs de la thèse

Dans ce contexte, la thèse se propose de mieux comprendre les effets du déploiement d'une VR2+ à court terme. La granularité temporelle liée à cette échelle peut aller de la minute à la journée, voire la semaine, c'est donc l'échelle de la circulation et de l'écoulement du trafic. Il reste encore des enjeux à traiter à cette échelle, liés à une méconnaissance de l'écoulement du trafic dans certaines zones lorsque la VR2+ est activée, ce qui peut induire des erreurs dans l'estimation des temps de parcours. Envisager un travail cohérent à une granularité temporelle plus grande, qui s'appuie nécessairement sur l'échelle du court terme, ne sera possible qu'une fois ces verrous levés. C'est d'autant plus crucial que c'est à cette plus grande échelle que les synergies entre la VR2+ et des méthodes de gestion du trafic et de la demande en déplacement peuvent être envisagées dans le but d'atteindre l'objectif, à long terme, d'un report modal.

Plus précisément, les objectifs de la thèse quant à cette échelle du court terme sont doubles. Il s'agit d'abord d'améliorer les modélisations déjà existantes en tenant compte de la réorganisation des véhicules en amont et en aval de la section où une VR2+ est activée, mais aussi au droit des bretelles présentes le long du linéaire. À ces endroits, que l'on dénomme les interfaces, cette réorganisation des véhicules s'explique par le fait qu'ils doivent utiliser la bonne voie, ce qui induit des changements de voie. Ces derniers engendrent, comme le documente la littérature, des chutes de capacité, qui n'ont pas encore été intégrées aux modèles développés jusqu'ici. Le risque est alors qu'ils mésestiment les conditions de trafic qu'induit une VR2+. Ensuite, il s'agit de développer des outils permettant d'évaluer la performance d'une VR2+ sur cette échelle du court terme. C'est d'autant plus important que le seul incitatif vers le report modal pouvant être étudié à cette échelle, donc quantifiable par la théorie du trafic, et donc utilisé pour les études d'opportunité et d'évaluation *a priori*, est celui des temps de parcours. Les autres aspects, comportementaux ou liés à des facteurs socio-économiques, ne peuvent en effet pas entrer en compte dans cette description. Ces changements ont un impact environnemental qui se mesure alors à moyen ou long terme. La détermination de cet impact n'est donc pas un objectif de la thèse.

Articulation de la thèse

Ce manuscrit est divisé en trois parties. La partie I pose le contexte opérationnel et scientifique de la thèse. Plus précisément, le chapitre 1 présente les enjeux et objectifs poursuivis par les gestionnaires de trafic, liés au déploiement des VR2+ sur le territoire français. Cette présentation débute par les objectifs généraux des mobilités quotidiennes partagées, liés à la transition écologique et sociale, avant de réduire progressivement le discours aux VR2+ et aux spécificités liées à leur déploiement en France. L'analyse menée permettra de mettre en exergue deux mesures d'accompagnement spécifiques : l'abaissement, réglementaire, de la vitesse limite autorisée lorsque la VR2+ est activée, et la possibilité d'activer la VR2+ de manière adaptative, c'est-à-dire suivant les conditions de trafic. Les propos de ce chapitre sont éclairés par des entretiens réalisés avec des gestionnaires de VR2+ et des experts nationaux de la mobilité. Le chapitre 2 présente ensuite les trois outils utilisés pour décrire l'écoulement du trafic, sur lesquels sont construites les méthodes améliorées et développées le long de la thèse : la modélisation analytique, la simulation dynamique et les données de

terrain.

La partie II se concentre sur la description des conditions de trafic à proximité des trois types identifiés d'interfaces des VR2+. Leur fonctionnement rappelant celui au droit des divergents et convergents autoroutiers, le chapitre 3 propose d'abord le développement d'une méthode d'intercomparaison, ou de *benchmark*, d'outils de simulation microscopique. Il est donc important de s'assurer que ces outils, très utilisés dans la recherche et par les bureaux d'étude, reproduisent correctement le fonctionnement attendu au droit de ces discontinuités, fonctionnement qui est la brique de base de celui ces interfaces identifiées. Ensuite, le chapitre 4 vise à compléter la modélisation analytique de l'écoulement du trafic induit par l'activation d'une VR2+. Il présente d'abord la modélisation analytique de l'interface amont, adaptée de celle des zones d'entrecroisement par Marczak (2014). Il montre ensuite, en approfondissant les travaux de Menendez et Daganzo (2007), de Daganzo et Cassidy (2008) et de Hans et Damas (2019), que plusieurs configurations d'offre et de demande en trafic sont propices à la performance d'une VR2+. Un outil simple d'aide à la décision est alors développé, relatif à l'opportunité d'un déploiement de VR2+ sur le critère tactique d'une garantie de meilleurs temps de parcours pour les VOM, mais aussi sur le critère opérationnel de la remontée de file d'attente qui peut intéresser certains exploitants de la route.

Enfin, la partie III permet le développement d'une méthode générique d'évaluation de la performance d'une VR2+, sur la base des temps de parcours expérimentés. Cette performance est assurée lorsque les VOM gagnent du temps par rapport aux véhicules individuels, et lorsque les VOM ne perdent pas de temps par rapport à la situation d'avant-projet où la VR2+ n'était pas déployée. Cette méthode est présentée dans le chapitre 5. Trois dimensions sont examinées, au travers de différents scénarios, afin d'étudier la sensibilité de la performance. Il y a ainsi la proportion estimée en VOM dans le trafic lorsque le projet est déployé, mais aussi deux dimensions spécifiques au contexte opérationnel français. Il s'agit de la vitesse limite autorisée lorsque la VR2+ est activée, ainsi que la modalité d'activation et de désactivation de la VR2+ – statique ou adaptative –. Le chapitre 6 applique ensuite cette méthode à un cas réel, celui de l'autoroute A7, à l'entrée sud de Lyon. À partir de données récoltées sur ce terrain, ce cas est reproduit en simulation microscopique. Après cette évaluation, un scénario de prospective est proposé. Il vise à traduire une hypothétique situation d'évolution de la demande en trafic à court ou moyen terme, en raisonnant sur l'évolution du nombre de covoitureurs à nombre constant de passagers.

Liste des valorisations

Publication en revue internationale de rang A

- Boukhellouf, M., Buisson, Ch., Chiabaut, N. (2023). Merging and diverging operations: benchmark of three European simulation tools and comparison with analytical formulations. *European Transportation Research Review*.

Communication avec actes en congrès international

- Boukhellouf, M., Chiabaut, N., Buisson, Ch. (2022). High-occupancy vehicle lanes: modeling the upstream interface capacity. 10^e symposium du *European Association for Research in Transportation*, Louvain (Belgique), 3 juin.

Autres communications orales

- Boukhellouf, M. (2021). « Des voies réservées aux mobilités partagées pour gérer le trafic du court terme au long terme ». Café des Sciences de l'ENTPE, Vaulx-en-Velin (France), 2 novembre;
- Boukhellouf, M. (2022). « Voies réservées aux mobilités partagées : les défis de la modélisation du court terme ». 6^e rencontres interdisciplinaires doctorales de l'architecture et de l'aménagement durable de l'ENTPE et de l'ENSAL, Vaulx-en-Velin (France), 8 février. *Prix de la meilleure présentation de l'atelier « Gestion durable des transports ».*

Première partie

Contexte opérationnel et scientifique

Chapitre 1

Déploiement des VR2+ en France : état des lieux opérationnel

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'objet d'étude de cette thèse, les VR2+, dans le contexte français des mobilités du quotidien. Cela permettra de décrire l'état de la doctrine technique de leur déploiement en France, en mettant en évidence les spécificités réglementaires et opérationnelles. Outre une étude bibliographique, le chapitre s'appuie sur des entretiens menés avec six experts de la mobilité et exploitants de la route travaillant sur des projets de VR2+ françaises, avec l'ambition d'illustrer l'appropriation concrète de ce nouvel objet de l'ingénierie de la mobilité.

Ainsi, la partie 1.1 introduit le contexte de transition des mobilités dans lequel s'inscrit le déploiement d'une VR2+. Ensuite, la partie 1.2 aborde ses principes généraux et ses objectifs. Enfin, la partie 1.3 expose les principes mis en place pour assurer la performance de ces voies à court et à long terme. Les personnes interrogées pour éclairer le propos des deux dernières parties sont :

- deux experts de la mobilité travaillant au Cerema :
 - Pascal Glasson, directeur de projets régulation des trafics et voies réservées à la Direction technique Territoires et Ville, interrogé le 21 février 2023 ;
 - Mathieu Luzerne, responsable d'études de conception multimodale à la Direction territoriale Méditerranée, interrogé le 31 mars 2023 ;
- quatre personnes travaillant pour des exploitants de la route :
 - Thomas Courbon, chef du service des Politiques et Techniques de la Direction interdépartementale des Routes (DIR) Nord, interrogé le 8 février 2023 au sujet du projet de déploiement de VR2+ sur l'autoroute A1 près de Lille prévu pour mi-2023 ;
 - François Jeanjean, chef de projet études et développement du réseau chez Autoroutes Rhône et Alpes (AREA), société concessionnaire filiale des Autoroutes Paris-Rhin-Rhône (APRR), interrogé le 8 mars 2023 au sujet de la VR2+ déployée sur l'autoroute A48 près de Grenoble depuis septembre 2020 ;
 - Christophe Desnouailles, responsable du département Études générales et voies réservées à la Direction des Routes d'Île-de-France (DiRIF), interrogé le 28 mars 2023 au sujet du projet avorté en 2021 de déploiement de VR2+ sur l'autoroute A15 près de Paris ;
 - Pierre Soulard, directeur des infrastructures et de l'exploitation des mobilités à la Métropole de Lyon, interrogé le 29 mars 2023 au sujet des VR2+ déployées sur les boulevards urbains requalifiés M6 et M7 près de Lyon depuis décembre 2020.

Le questionnaire qui leur a été soumis se situe en annexe A et les synoptiques des sections où sont activées les voies réservées concernées en annexe B. Le tableau 1.1 permet de synthétiser

les principales informations relatives à ces projets de déploiement.

VSA	M6		M7		A48	A1		A15
personne interrogée	Pierre Soulard				François Jeanjean	Thomas Courbon		Christophe Desnouailles
exploitant	Métropole de Lyon				AREA - APRR	DIR Nord		DiRIF
ville-centre	Lyon				Grenoble	Lille		Paris
sens de circulation par rapport à la ville-centre	entrant	sortant	entrant	sortant	entrant	entrant		entrant
état	déployée				déployée	projet (au moment de l'entretien)		abandonnée en avril 2021
modalité d'activation	statique, permanente				adaptative	statique, prédéterminée	adaptative	statique, prédéterminée
gestion de l'activation	dynamique				dynamique	dynamique		dynamique
date d'ouverture	21/12/2020				30/09/2020	juillet 2023	automne 2023	/
longueur de la VR2+ (km)	4,5	4,6	3,9	4,1	8	6,6	12	8,5
VLA sans VR2+ (km/h)	70				110	110	110	110
VLA à l'activation (km/h)	70				50	70	70	50

TABLEAU 1.1 – Synthèse des informations relatives aux VR2+ liées aux entretiens menés pour ce chapitre

1.1 La transition écologique et sociale des mobilités du quotidien en France s'appuie sur le covoiturage courte distance

La transition écologique et sociale touche nécessairement les mobilités, notamment pour les déplacements du quotidien. Pour parvenir à des mobilités plus propres et inclusives, et donc plus durables, le covoiturage courte distance peut être une solution. La France en a donc accéléré le développement depuis la fin des années 2010, en promulguant une loi et un plan structurants.

1.1.1 Tendre vers la durabilité des mobilités du quotidien

1.1.1.1 La nécessité mondiale d'une transition écologique et sociale

Estimée à 7,7 milliards fin 2022, la population mondiale pourrait, selon l'**Organisation des Nations unies** (2022), atteindre les 10 milliards en 2050, un chiffre deux fois plus élevé qu'en 1985. Pour répondre aux besoins et aux modes de vie d'êtres humains de plus en plus nombreux, le fonctionnement de la société s'appuie sur un modèle global de production tablant sur une croissance économique à la vision court-termiste, dans le sens où le gain et le profit immédiats sont, généralement, privilégiés par les différents acteurs économiques. Plus précisément, ce modèle se caractérise par la surconsommation et l'exploitation excessive des ressources naturelles, notamment pour répondre aux besoins énergétiques qui

dépendent principalement du pétrole, du charbon ou du gaz naturel, ressources non renouvelables et polluantes (Grandjean, 2012). Depuis sa généralisation à partir de la fin de la révolution industrielle, ce modèle a considérablement participé aux progrès techniques et technologiques, particulièrement notables depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, qui ont engendré une hausse sensible du niveau de vie médian. Sa caractérisation présente cependant des conséquences négatives structurantes des points de vue environnemental et socio-économique (Besançon, 2018). En effet, le réchauffement climatique, la dégradation de la qualité de l'air et la perte de biodiversité s'accroissent (Baude *et al.*, 2020 ; Domergue et Ebner, 2021), entraînant une dégradation environnementale mondiale. Il en est de même pour l'accès inégal aux ressources et pour la polarisation de l'emploi et des revenus, entraînant une fragmentation socio-économique mondiale des populations (Grandjean, 2012 ; Kestemont, 2013 ; Bigot et Hoibian, 2014). Cet état des lieux, constaté par les organisations internationales à partir des années 1970 (Meadows *et al.*, 1972 ; Brundtland Harlem, 1988) mais toujours d'actualité de nos jours (Garric, 2022), montre que ce modèle n'est pas des plus durables.

Il est donc nécessaire de tendre vers un modèle de société plus soutenable, c'est-à-dire qui vise à garantir l'équilibre entre les besoins humains, la préservation de l'environnement et les enjeux sociaux. Pour y parvenir, une démarche de transition écologique et sociale est à entreprendre. Les deux aspects de cette transition sont intrinsèquement liés et doivent être abordés conjointement pour construire ce modèle de société durable (Laville, 2012 ; Laurent et Pochet, 2015) :

- sa composante *écologique* vise à réorienter notre approche de production et de consommation vers des pratiques plus respectueuses de l'environnement et vertueuses des ressources à notre disposition (Grandjean, 2012 ; Laville, 2012) ;
- sa composante *sociale* aspire simultanément à tirer profit de cette réorientation pour qu'elle améliore les conditions de vie des êtres humains, de sorte à rendre la société plus équitable, inclusive, sûre et unie (Laurent, 2018 ; Ballet *et al.*, 2020).

Comme l'indique son nom, cette transition vers une société durable est immanquablement graduelle (Laurent et Pochet, 2015). De plus, cette gradualité doit permettre une mobilisation et une responsabilité progressives à tous les niveaux de la société. Ainsi, les institutions majeures que sont les États ou les organisations internationales ont bien sûr leur rôle à jouer, en alertant ou en construisant des politiques publiques structurantes sur le sujet. Il ne faut cependant pas oublier les premières personnes concernées par la transition, c'est-à-dire les citoyennes et citoyens. Elles doivent pouvoir s'approprier, à leur niveau, l'action de cette transition et s'y sentir impliquées. Cela doit se traduire par la possibilité d'agir directement sur leur environnement et par une mise en lien de leurs activités et de leurs usages (Laigle, 2013), par exemple en partageant leur mobilité pour réduire les émissions de polluants induites par leur déplacement, comme on y reviendra tout au long de ce chapitre. Cependant, cette démarche peut être rejetée si la population l'éprouve comme une sur-responsabilité et une infantilisation (Martin et Dubuisson-Quellier, 2019). Elle peut aussi être vécue comme une injustice si l'effort de réduction demandé à tout un chacun n'est pas proportionné à ses impacts environnementaux, notamment celui demandé aux pays et classes sociales les plus émetteurs (Cusset, 2023).

1.1.1.2 Des mobilités du quotidien encore trop polluantes et inégalitaires en France

On définit, dans cette thèse, les *mobilités du quotidien* comme les déplacements réalisés en jour de semaine et ayant pour origine ou pour destination le domicile. Ils sont donc, par essence, locaux, récurrents et nécessaires à l'accomplissement de la vie personnelle et professionnelle. Parmi les motifs de déplacement, on peut par exemple citer la santé, les

loisirs et la culture, les courses, ou encore les études. Cependant, un motif se distingue par son ampleur. Il s'agit du travail, puisque 36,8 % de la population française réalisait un déplacement domicile-travail en 2017 (Brutel et Pages, 2021). C'est ainsi que les déplacements domicile-travail prendront une place importante, dans tout ce chapitre, dans l'analyse des mobilités du quotidien.

Les mobilités du quotidien sont caractérisées par trois attributs :

- **une utilisation massive de la voiture.** Le tableau 1.2 spécifie les modes principaux utilisés à l'occasion de ces mobilités du quotidien. Sa lecture indique que la voiture reste, de nos jours, un incontournable de ces mobilités, et ce d'autant plus pour le motif domicile-travail. C'est d'ailleurs davantage le cas lorsque le domicile se situe en couronne de l'aire d'attraction d'une ville¹. L'utilisation de la voiture y caractérise alors 89,1 % des déplacements domicile-travail (Brutel et Pages, 2021), alors qu'elle est de l'ordre de 60 % au sein des pôles. On dénombre donc parmi ces trajets au moins 15 % de déplacements pendulaires, qui sont typiques des agglomérations des métropoles françaises. Elles se développent au détriment de villes plus éloignées, plus petites et moins attractives économiquement. L'armature urbaine de la France métropolitaine, présentée sur la carte de la figure 1.1, met ce phénomène de métropolisation, et donc ces déplacements pendulaires, en évidence. Il concerne évidemment Paris, mais aussi la plupart des capitales régionales.
- **une congestion routière récurrente.** Du fait de l'organisation du travail, les déplacements liés au motif domicile-travail se concentrent en début de matinée et en fin d'après-midi, pendant les *périodes de pointe* (Lavielle, 2008 ; Munch et Proulhac, 2019). Au vu de la prépondérance du mode voiture et du phénomène de métropolisation, on comprend alors que pour les principales métropoles du pays, des usagers provenant d'origines diverses viennent converger vers une destination commune, qui correspond à la ville-centre et à son pôle urbain. En conséquence, une sur-concentration d'usagers est observée sur les voies structurantes d'agglomération (VSA) (Reynaud et al., 2013 ; Éneau et al., 2018). Ces axes routiers répondent aux besoins de circulation entre les différents pôles d'une aire urbaine et permettent d'atteindre son centre au plus vite en situation nominale. Ainsi, les périodes de pointe y sont caractérisées par le phénomène de *congestion*, qui traduit qu'à ces périodes, la demande en trafic est supérieure à l'offre de l'infrastructure routière. En conséquence, les véhicules sont ralentis ;
- **des trajets automobiles majoritairement non partagés.** En 2019, 74 % des déplacements réalisés en voiture en semaine de 6h00 à 9h00, intervalle pouvant correspondre à la période de pointe du matin, étaient caractérisés par l'*autosolisme*, c'est-à-dire le fait d'être le seul occupant de la voiture que l'on conduit. Pour les déplacements professionnels, il s'agissait de 88 % de ceux réalisés en voiture, quelle que soit l'heure du déplacement (Brahmi et al., 2022).

Dans un contexte de déplacements en augmentation constante et de plus en plus dispersés spatialement, cette tri-caractérisation contemporaine des mobilités du quotidien montre qu'elles ne répondent pas à un objectif de soutenabilité, et ce sur au moins deux aspects.

La première dimension de ce constat est environnementale. Le secteur des transports est en effet source d'émissions polluantes, étant par exemple responsable de 31 % des émissions

1. L'Insee définit une aire d'attraction comme « composée d'un pôle, défini à partir de critères de population et d'emploi, et d'une couronne, constituée des communes dont au moins 15 % des actifs travaillent dans le pôle. Au sein du pôle, la commune la plus peuplée est appelée commune-centre. » Source : <https://www.insee.fr/fr/information/4808607>

Mode		Déplacements, pour tout motif, à moins de 80 km du domicile, en 2019 (Lezec et Perez, 2023)	Déplacements domicile-travail à moins de 150 km du domicile, en 2017 (Brutel et Pages, 2021)
voiture		62,8 %	73,7 %
transports en commun		9,1 %	15,8 %
modes « doux »	marche	23,7 %	6,3 %
	vélo	2,7 %	2,2 %
autres (dont deux-roues)		1,7 %	2 %

TABLEAU 1.2 – Distribution du mode principal de transport au quotidien pour tous les motifs et pour le motif domicile-travail, en France

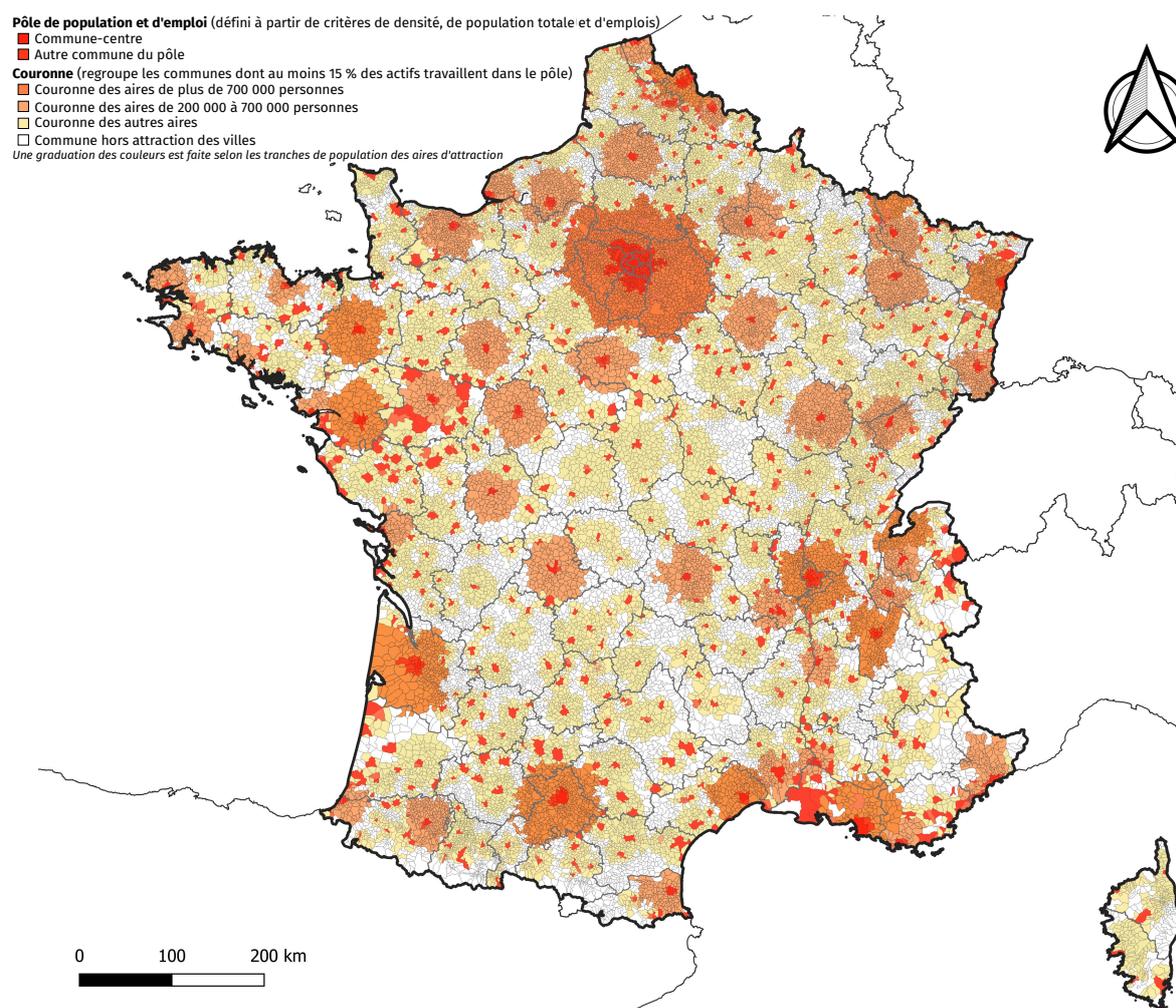


FIGURE 1.1 – Armature des aires urbaines d'attraction de la France métropolitaine au 1^{er} janvier 2020. **Source** : adapté du travail de l'utilisateur [Roland45](#) de Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0

de gaz à effet de serre en France en 2019 (Babet et Bouvry, 2021). Pour le transport routier, on distingue les émissions hors échappement de celles à l'échappement. Les premières proviennent de l'usure des pneus, des freins et de la route, générant des particules mises en suspension dans l'air au passage des véhicules (Padoan et Amato, 2018). Les deuxièmes proviennent de la combustion du carburant dans le moteur des véhicules thermiques, qu'ils soient à essence ou diesel. On distingue alors principalement les polluants suivants (Bhandarkar, 2013) :

- le dioxyde de carbone (CO₂), dont la moitié des émissions dans le secteur des transports, en 2019 en France, provenaient des véhicules particuliers (Babet et Bouvry, 2021);
- le monoxyde de carbone (CO);
- les oxydes d'azote (communément dénommés NO_x) : le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂);
- les *particulate matters* (PM), dites encore particules en suspension. On distingue les PM10, particules dont le diamètre est inférieur à 10 µm, et les PM2.5, dont le diamètre est inférieur à 2,5 µm et qui sont encore dénommées particules fines;
- les hydrocarbures.

Le parc automobile français étant composé, au 1^{er} janvier 2020, à 97,7 % de véhicules thermiques (Service des données et études statistiques, 2020), on comprend que les mobilités du quotidien contribuent à ces émissions polluantes. C'est d'autant plus le cas que l'autosolisme est prépondérant : une voiture contenant généralement jusqu'à quatre autres sièges, ces sièges vides représentent autant de potentialités manquées pour réduire, par individu, ces émissions. Enfin, soulignons cependant que le parc automobile est relativement jeune, avec une moyenne de dix ans. Cela le rend moins polluant qu'auparavant grâce à l'optimisation de l'efficacité énergétique des véhicules plus récents, une baisse moyenne annuelle de l'ordre de 4 à 5 % des émissions étant estimée pour les NO_x et les PM10 depuis 1994 (Babet et Bouvry, 2021).

Pour les couronnes périurbaines des aires d'attraction et les zones rurales, la deuxième dimension de ce constat est socio-économique. Dans ces territoires éloignés des villes-centre et moins densément peuplés, l'utilisation de la voiture témoigne de l'absence d'une alternative crédible de mode de transport plus vertueux (Broto, 2014). Pour accomplir cette longue distance, il est, d'une part, généralement inenvisageable de réaliser un déplacement à pied ou à vélo. D'autre part, ces territoires ne disposent souvent pas d'une connexion avec un réseau de transports en commun, ou bien cette connexion ne permet pas d'assurer une desserte fréquente ou fiable en période de pointe. La voiture y devient alors souvent le seul moyen de transport disponible pour rejoindre la ville-centre où se concentrent les principales activités économiques, donc le travail. Cela participe alors de l'enclavement géographique et économique des territoires français éloignés des métropoles, et donc celui de leur population, inégalités dont l'accroissement dénote depuis la fin des Trente Glorieuses (Fourquet et Cassely, 2021).

1.1.2 Un champ d'action : partager sa mobilité du quotidien

1.1.2.1 Principes d'une démarche ancrée dans la transition

Les modes doux ne peuvent pas être considérés comme une alternative pertinente à la voiture individuelle dès lors que la distance à parcourir est grande, bien qu'ils soient totalement inscrits dans une démarche de transition écologique et sociale. Dans cette situation, l'alternative la plus crédible réside en les *mobilités partagées*. On les définit, dans cette thèse, comme les déplacements caractérisés par l'utilisation simultanée d'un même moyen de transport. Dans le contexte exposé, les mobilités partagées correspondent donc aux transports en commun et au *covoiturage*, défini par l'article L3132-1 du Code des transports « comme l'utilisation en commun d'un véhicule terrestre à moteur par un conducteur et un ou plusieurs passagers, effectuée à titre non onéreux, excepté le partage des frais, dans le cadre d'un déplacement que le conducteur effectue pour son propre compte. Leur mise en relation, à cette fin, peut être effectuée à titre onéreux. »² Sont donc exclus de cette définition

2. Source : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000039784386

les services de taxi et de véhicules de transport avec chauffeur. Il est enfin important de noter que la définition faite ici des mobilités partagées ne doit pas être confondue avec celle des mobilités caractérisées par le partage séquentiel d'un même moyen de transport, comme le sont l'autopartage et le vélopartage.

Le report modal de la voiture individuelle vers une mobilité partagée est un champ d'action pour tendre vers la soutenabilité des mobilités du quotidien, de par ses conséquences observées et attendues :

- l'ambition de tendre vers une utilisation optimale des ressources, qui se traduit ici par l'occupation maximale des sièges offerts dans les véhicules ;
- une diminution de la congestion, induite par celle du nombre de voitures simultanément en circulation, donc une baisse du temps de parcours à demande de déplacements constante (Abdulrazzaq *et al.*, 2020 ; Alisoltani *et al.*, 2021) ;
- en conséquence de cette diminution du nombre de véhicules en circulation, une réduction de la consommation d'énergie et des émissions polluantes urbaines et périurbaines (Noland *et al.*, 2006 ; Minett et Pearce, 2011) ;

1.1.2.2 Leviers et freins à la pratique des mobilités partagées au niveau individuel

Les mobilités partagées peuvent, pour des commodités exposées de manière non exhaustive dans cette partie, être un mode de transport qui peut convenir à un tel usager mais ne pas convenir à tel autre. Pour modéliser ceci, la notion de coût généralisé est très souvent utilisée (Crozet, 2005). Chaque mode de transport vient avec ses commodités, qui rejoignent les leviers et freins décrits ci-après. Le coût généralisé consiste alors à convertir en un équivalent monétaire l'intérêt ou le désintérêt qu'a l'utilisateur de chacune de ces commodités. Chaque usager est considéré comme un *homo economicus*, c'est-à-dire un être humain rationnel qui cherche à maximiser son utilité, donc à minimiser son coût généralisé, suivant les contraintes qui lui sont imposées. Dans le cas des transports, le temps alloué pour réaliser un trajet est souvent la contrainte la plus forte.

De nombreux leviers techniques et psychologiques peuvent inciter les individus à partager leur mobilité. Ces leviers, s'ils sont enclenchés de manière adéquate, participent à diminuer les coûts généralisés des utilisateurs. On peut alors citer, entre autres :

- un coût d'utilisation de la voiture moindre, dans le cas du covoiturage, ou inexistant dans le cas des transports en commun. Ce coût comprend celui l'entretien du véhicule, celui du carburant, et celui du péage autoroutier le cas échéant (Delcampe, 2018) ;
- l'assurance d'un temps de parcours le plus bas possible en optant pour ce choix modal (Olsson *et al.*, 2019 ; Le Goff *et al.*, 2022) ;
- en relation avec le levier précédent, l'assurance d'un trajet permettant d'éviter des ruptures de charge importantes, c'est-à-dire des temps d'attente élevés entre les correspondances lors d'un trajet en plusieurs étapes (Stokkink *et al.*, 2023). Le développement d'aires multimodales devrait favoriser ce point (Chowdhury et Ceder, 2016) ;
- l'appropriation personnelle par le citoyen ou la citoyenne en vue d'avoir une influence sur son propre milieu. Celle-ci est appuyée par une motivation sociétale ou environnementale : ainsi certaines personnes motivent-elles leur choix de covoiturer principalement par l'entraide, valeur qu'elles retrouvent dans l'économie collaborative qui est inhérente à ce mode de transport (Pigalle et Aguiléra, 2020).

Malgré ces leviers potentiels et les avantages certains à l'échelle de la société décrits dans la partie 1.1.2.1, les mobilités partagées peuvent ne pas convenir à certains usagers au quotidien, que ce soit par choix ou par impossibilité.

Certains aspects intrinsèques aux systèmes de mobilité partagée peuvent décourager le report modal, et donc augmenter le coût généralisé de l'usager. On pense d'abord à la fiabilité, qui peut parfois leur faire défaut. Dans les zones densément peuplées, les bus peuvent subir d'importants retards du fait de la congestion urbaine ou de la variabilité des temps de montée et descente des passagers (Hans, 2015). Certaines lignes de trains régionaux peuvent présenter un matériel roulant défectueux, ce qui conduit parfois à l'annulation pure et simple de la mission et ne manque pas d'exaspérer les usagers (Faucheux, 2023). La crédibilité du système peut donc être remise en question si la fréquence de ces événements est élevée.

Quant au covoiturage, des freins plus spécifiques existent (Ballet et Clavel, 2007 ; Vincent, 2008 ; Delcampe, 2018 ; Hasiak et Palmier, 2019 ; Crozet, 2022) :

- le manque de flexibilité et de souplesse, par le fait de s'organiser quotidiennement pour chercher un autre covoitureur puis pour convenir avec lui de l'heure et de l'itinéraire du trajet. Cet itinéraire peut d'ailleurs induire un détour et donc un trajet plus long. Ce trajet peut de plus varier suivant la journée, son organisation et les activités prévues ;
- le manque de confiance et la crainte de l'inconnu lorsque l'on ne connaît pas les autres covoitureurs. On ne connaît alors pas le comportement de chacun, ni le style de conduite du conducteur ;
- le manque de confort et d'autonomie pour les occupants qui abandonnent l'effet bulle offert par l'autosolisme (concentration et calme, écoute de la musique ou de la radio, appel téléphonique par un kit mains libres, ...). Pour le conducteur, ce manque se traduit aussi par le partage de l'espace personnel que peut représenter sa voiture. Pour le covoituré, il se traduit aussi par la sensation de ne pas être maître de son trajet et de dépendre du conducteur.

Le fait de ne pas pouvoir partager sa mobilité peut s'expliquer, comme on l'a illustré dans la partie 1.1.1.2 pour les transports en commun, par une offre inexistante ou trop peu soutenue, ou bien pas adaptée au rythme de vie, par exemple pour les personnes travaillant à des horaires décalés. Pour ces personnes, le véhicule à faibles émissions (VFE), qu'il soit électrique ou à hydrogène, peut être une solution soutenable d'un point de vue environnemental. Cependant, bien qu'ils ne soient pas polluants lorsqu'ils circulent, la question de la toxicité et de l'impact polluant de la construction des batteries des véhicules électriques se pose, ce qui peut remettre en cause leur usage pour une démarche de transition (Notter *et al.*, 2010 ; Buisson et Pélissier, 2022).

1.1.2.3 Le covoiturage courte distance gagne récemment en potentiel, donc en intérêt

Comme en témoignent les gares, les arrêts de métro, de tramway ou de bus qui émaillent les paysages des villes françaises, les transports en commun représentent la solution de mobilités partagées la plus développée pour les mobilités du quotidien. Cependant, le covoiturage courte distance, encore appelé covoiturage du quotidien, offre des perspectives d'essor telles qu'il peut devenir une alternative crédible au mode voiture individuelle. Cela justifie donc, dans cette thèse, l'étude de cet objet venant en complément de l'offre en transports existante, et celle de ses conséquences sur le système global de la mobilité.

Pour expliquer ce récent intérêt, développons d'abord, à partir des travaux de Ballet et Clavel (2007) et de Vincent (2008), un bref historique de la pratique du covoiturage en France avant les années 2010. À partir de la fin des années 1950, les partages de trajets courte distance entre étudiant-es, voisin-es, ami-es ou collègues émergent et sont documentés. Cependant, cette pratique du covoiturage restait informelle et organisée de manière très ponctuelle.

Les grèves de fin 1995, en entravant durablement les déplacements en transports en commun, vont aboutir à l'institution du covoiturage organisé. Selon ce principe, les covoituteurs passent par une entité intermédiaire, la plupart du temps une association, pour être mis en relation. Dans les années 2000, le développement du numérique permet la multiplication d'autres entités, les opérateurs privés, dont leurs plateformes étaient au moins 48 en 2007 (Ballet et Clavel, 2007). Dans le même temps, les entreprises et administrations publiques, fortement incitées par les autorités organisatrices de transports urbains à se doter de plans de déplacements comme l'imposait dès 2000 la loi solidarité et renouvellement urbain, peuvent sensibiliser leurs employés à covoiturer. Il en résulte à la fois une variété trop importante d'entités intermédiaires et une interopérabilité défailante, puisque cela incite les covoituteurs à s'inscrire sur un maximum de plateformes pour pouvoir trouver un trajet. Cette illisibilité de l'offre est un frein qui n'incite pas, à la fin des années 2000, les potentiels covoituteurs à sauter le pas (Delaunay et Baron-Yellès, 2019).

Les années 2010 sont marquées par le chevauchement de trois phénomènes :

- un développement et une popularisation du covoiturage ponctuel longue distance. Le nombre de déplacements par ce mode représentait, en 2015, 10 % de ceux longue distance en train (Wagner, 2016). Cela s'explique grâce à l'essor des plateformes, permis par leur transition numérique réussie (Shaheen *et al.*, 2017), et facilité par la démocratisation de l'internet mobile;
- un covoiturage dynamique qui gagne en crédibilité. Cette solution vise à apparier en temps réel passagers et conducteurs, facilitant l'organisation d'un covoiturage spontané et flexible. Déjà essayé à l'étranger dans les années 2000, ses résultats étaient peu probants à cause de limitations techniques puisque les systèmes reposaient sur l'envoi d'une requête par texto (Ballet et Clavel, 2007). Il commence à devenir réaliste du fait de la généralisation de l'accès permanent à internet et des progrès technologiques (Guyader *et al.*, 2021);
- une volonté, dans certaines collectivités territoriales, de développer le covoiturage du quotidien (Chapron *et al.*, 2013 ; Delcampe, 2018) :
 - en lançant des campagnes d'incitations locales au covoiturage, qui peuvent aller jusqu'à un financement indirect de la pratique. Par exemple, Île-de-France Mobilité a permis aux détenteurs de sa carte Navigo de bénéficier de tarifs réduits sur ses plateformes de covoiturage partenaires;
 - en desservant leurs communes par des lignes organisées comme celles de transports en commun avec des arrêts intermédiaires, gérées par des opérateurs de covoiturage. On peut citer celle ouverte en 2018 entre Lyon et Bourgoin-Jallieu, ville de l'aire d'attraction lyonnaise (Delcampe, 2021);
 - en expérimentant des VR2+, en agglomération comme près de Bordeaux ou hors agglomération comme à la frontière suisse (Glasson, 2023). Cela traduit une réflexion menée dès 2014 par l'État (Rocchi *et al.*, 2014).

Ainsi, les avancées numériques et technologiques permettent d'entrevoir le développement de systèmes de covoiturage plus souples, flexibles et faciles d'utilisation (Pigalle et Aguiléra, 2020), éliminant l'un des freins principaux à cette pratique du covoiturage. Les opérateurs de covoiturage privés voient alors ces avancées de manière favorable, tout comme la puissance publique (Delcampe, 2018 ; Rousic *et al.*, 2018). Dans un objectif de transition écologique et sociale, cette dernière voit là l'occasion de promouvoir la pratique du covoiturage du quotidien (Delaunay et Baron-Yellès, 2019).

1.1.3 La réponse législative française pour développer le covoiturage courte distance

De l'historique précédent, un enjeu principal ressort à la fin des années 2010. La puissance publique, en ce qu'elle organise les transports sur le territoire, doit se donner les moyens de rendre plus cohérente, visible et réaliste l'organisation de la pratique du covoiturage dans le système de transports du quotidien. L'objectif est alors de massifier cette pratique et de continuer à éliminer les freins qui entravent son développement. Pour combler ce retard, une loi structurante a été promulguée et un plan d'accompagnement financé, une ambition inédite depuis les débuts du covoiturage sur le territoire français.

La loi d'orientation des mobilités (LOM), promulguée en 2019, vise à diriger la transition écologique et sociale des mobilités. Elle permet ainsi d'actualiser le cadre législatif de l'organisation des transports, jusqu'ici structuré par la loi d'orientation des transports intérieurs, promulguée presque quarante ans auparavant. Pour ce faire, ses trois objectifs globaux sont :

1. de tendre vers des mobilités moins carbonées ;
2. de promouvoir des solutions de mobilité du quotidien innovantes et facilitant les déplacements de la population ;
3. d'investir plus largement et de manière plus ciblée qu'auparavant dans les systèmes et moyens de transport du quotidien.

La promotion de la pratique du covoiturage du quotidien entre dans ces trois objectifs, ce qui transparaît, et ce de manière inédite par rapport aux précédentes législations, dans cette loi. L'article 35 de la LOM institue ainsi :

- par modification du Code des transports, que les autorités organisatrices de la mobilité (AOM), regroupant une ou plusieurs collectivités territoriales et ayant la charge de l'organisation des transports urbains sur leur ressort territorial, ont la compétence locale du développement du covoiturage. Il est alors prévu que les AOM :
 - construisent un « schéma de développement » des aires de covoiturage sur leur ressort territorial, pour les mettre en cohérence par rapport à l'offre existante de transports et à la demande actuelle et à venir en covoiturage ;
 - puissent verser une indemnité aux covoitureurs, incitant ainsi à la pratique. La loi prévoit aussi que l'employeur participe à la prise en charge du *forfait mobilités durables*. Cette somme peut atteindre 300 (resp. 800) euros³ dans la fonction publique (resp. le secteur privé) et est attribuée aux salariés effectuant leur déplacement autrement qu'en voiture individuelle ;
- par modification du Code de la route, que l'autorité locale de police de la circulation est autorisée à réserver certaines portions de voies de sa voirie à l'usage exclusif de catégories de véhicules caractérisées par un usage plus vertueux : les transports en commun, les taxis, les VOM et les VFE.

La LOM institutionnalise donc les initiatives locales vues dans la partie 1.1.2.3. La figure 1.2 schématise alors, en agglomération urbaine, l'écosystème du covoiturage du quotidien à plus ou moins long terme, si les dispositions de la LOM étaient toutes mises en œuvre de manière cohérente. Bien qu'elles ne soient pas explicitement citées dans la LOM, les lignes de covoiturage y ont été incluses, en ce qu'on considère que leur développement peut participer à celui de la stratégie locale du covoiturage du quotidien.

L'application des aspects liés au covoiturage dans la LOM a été consolidée par le plan national du covoiturage du quotidien (PNCQ), dévoilé fin 2022. Son objectif est de passer de 900 000 à 3 millions de covoitureurs du quotidien en quatre ans. Il mobilise directement le budget de l'État sur trois enveloppes de 50 millions d'euros chacune, pour :

3. Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/faq-forfait-mobilites-durables-fmd>

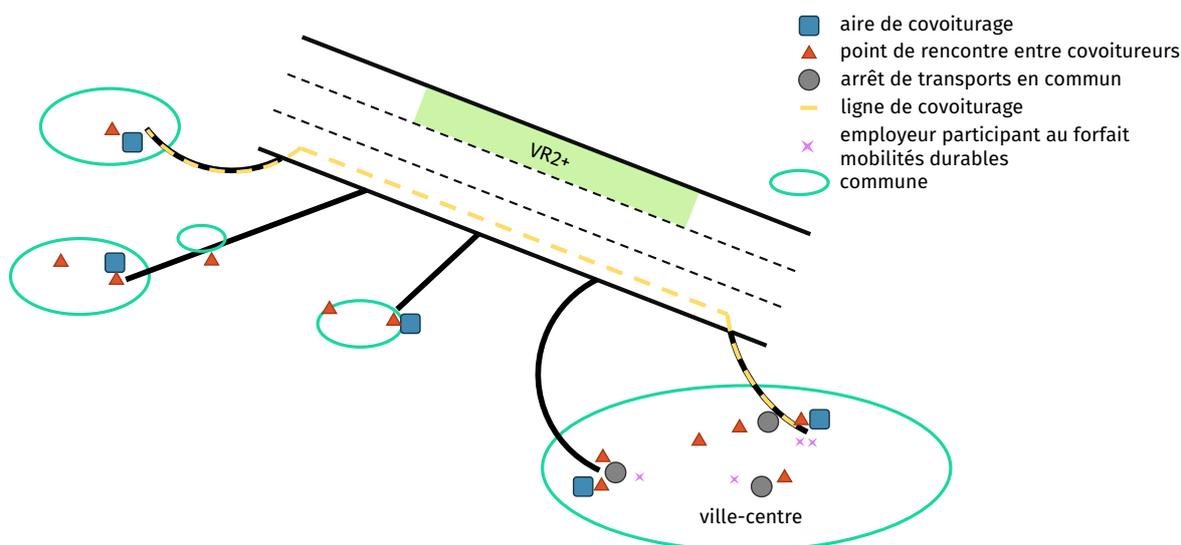


FIGURE 1.2 – Schéma de l'écosystème local attendu, à moyen et long termes, du covoiturage du quotidien en agglomération urbaine après la promulgation de la LOM

1. renforcer les incitations financières en récompensant les néo-covoitureurs d'une prime pouvant atteindre 100 euros s'ils covoiturent régulièrement;
2. continuer le soutien aux AOM, en subventionnant leurs campagnes d'incitation financière à hauteur de 50 %;
3. par le fonds vert, somme allouée depuis 2023 aux préfets pour stimuler la transition écologique dans leur département, financer des études pré-opérationnelles pour des VR2+, des lignes ou des aires de covoiturage et participer aux frais des travaux si le projet est retenu.

Au vu de son caractère structurant, il semble encore trop tôt, presque quatre ans après sa promulgation, pour tirer un bilan sur l'effet de la LOM sur la pratique du covoiturage du quotidien. C'est d'autant plus le cas qu'ont immédiatement suivi la pandémie de covid et ses restrictions sur les déplacements entre 2020 et 2022, puis l'inflation, notamment de l'énergie, entraînant une modification des comportements des individus (de Palma *et al.*, 2022). On peut raisonnablement penser que cette dernière se conjugue à celle conséquente aux mesures de la LOM. Notons tout de même qu'un report modal depuis la voiture individuelle vers le covoiturage a été mesuré localement. Par exemple, la région Pays de la Loire a lancé une campagne d'incitation financière en janvier 2021, permise par la LOM. En mars 2023, une enquête a révélé que 53 % des covoitureurs étaient nouveaux, dont 88 % étaient des autosolistes, les autres utilisant auparavant d'autres moyens de transport (Bourcier et Courbe, 2023). Enfin, pour le PNCQ, un premier bilan a été établi en juin 2023 par la Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (DGITM), administration centrale du Ministère de la Transition écologique (Georgeault, 2023). Il indique que 120 000 primes ont été attribuées à des néo-covoitureurs entre janvier et mai 2023. On en déduit que ces néo-covoitureurs, s'ils restent réguliers dans leur pratique, représentent à eux seuls 6 % de l'objectif des 2,1 millions de covoitureurs supplémentaires, atteint en 10 % du temps alloué. Dans le même temps, 40 dossiers liés au fonds vert quant au développement du covoiturage ont été acceptés, relevant principalement de l'aménagement d'aires en territoires ruraux et de campagnes d'incitation dans les métropoles.

1.2 Les VR2+, infrastructures en appui de la transition des mobilités du quotidien

Pour structurer et crédibiliser la pratique du covoiturage au quotidien, la LOM prévoit donc le déploiement des VR2+. Cette partie présente cet outil de l'ingénierie de la mobilité, inédit en France, en exposant ses principes généraux puis de mise en œuvre, ses objectifs ainsi que les acteurs impliqués dans son déploiement.

1.2.1 Principes et objectifs d'une réservation de voie

1.2.1.1 Des principes communs mais des possibilités de déploiement variées

Réserver une voie consiste à différencier la circulation en n'autorisant son accès qu'à une ou plusieurs catégorie(s) d'usagers prédéfinie(s). Dans un objectif de partage des mobilités, cette stratégie de gestion du trafic est utilisée en période de pointe pour prioriser les véhicules contenant des personnes ayant un usage vertueux de l'utilisation de la voiture. L'idée est que ces personnes, dont on a vu qu'elles étaient bien moins nombreuses que les autosolistes, circulent toutes sur la voie réservée et évitent ainsi la congestion. Cette dernière se répercute alors sur les voies non réservées, dites encore voies générales (VG), donc sur les autosolistes. Il s'agit, par ce procédé, de récompenser par un temps de parcours moindre, et plus fiable, les personnes qui partagent leur mobilité en compensant le fait qu'elles mettent leur confort de côté. La garantie qu'il soit effectivement moindre est un levier convainquant auprès des autosolistes de quitter ce confort (Quarmby, 1967 ; Dahlgren, 1998 ; Le Goff *et al.*, 2022). Ce principe est parfaitement illustré par la photographie de la figure 1.3. On y constate que les véhicules à occupation multiple (VOM) jouissent de conditions de trafic fluides sur la VR2+, tandis que les véhicules individuels (VI) sur les VG subissent la congestion générée en aval par le divergent autoroutier.

Dans ce contexte, le tableau 1.3 classe les variétés de déploiement des voies réservées suivant leur utilisation et la modification induite de la voirie. Il permet de distinguer trois types de voies réservées : les VR2+ pour les VOM, les VRTC pour les transports en commun, et les voies HOT pour les VOM et les autosolistes prêts à payer pour y accéder. Il est aussi mis en évidence la possibilité de pouvoir sortir de la voie réservée, comme c'est surtout le cas en Europe ; on parle alors d'une voie poreuse. Enfin, les voies réservées peuvent être ajoutées à la voirie existante, comme c'est plutôt le cas aux États-Unis, ou bien résulter d'une conversion de voie comme c'est le cas en Europe. Complétons ce tableau par deux remarques :

- au niveau des VR2+, Ballet et Clavel (2007) évoquent deux possibilités pour moduler la stratégie de déploiement, par exemple dans le cas où elle rencontre un succès important, c'est-à-dire que la VR2+ est très empruntée et ne peut supporter tout le débit de demande :
 - augmenter le nombre de VR2+ sur le tronçon où elle est déployée ;
 - ou augmenter le nombre d'occupants minimum autorisé, généralement trois (Derré, 2012).
- les voies HOT sont évoquées en ce qu'elles impliquent des VOM, mais aussi pour montrer les limites du déploiement des voies réservées. Par essence non poreuses, elles sont généralement déployées en conversion de VR2+ chroniquement sous-utilisées (Javid *et al.*, 2021). Le but affiché est d'optimiser l'infrastructure en termes d'écoulement du trafic. Bien que l'argument s'entende d'un point de vue opérationnel, c'est, au fond, abandonner les principes de la transition écologique et sociale en court-circuitant les valeurs d'un déploiement de voie réservée. En effet, on laisse la possibilité aux per-



FIGURE 1.3 – Conditions de trafic sur l’autoroute I-5 dans l’État de Washington (États-Unis) en 2017, où une VR2+ est déployée sur la voie rapide. **Source** : photo prise par l’utilisateur **SounderBruce** de Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0

sonnes qui en ont les moyens de s’affranchir des efforts de cette transition, renforçant le sentiment qu’elle ne concerne pas tout le monde.

Les voies réservées aux mobilités partagées sont apparues en 1969 avec l’ouverture, sur l’autoroute I-395 au nord-est des États-Unis, d’une VRTC (Javid *et al.*, 2021). Ensuite, la promulgation de la loi fédérale *Clean Air Act* en 1970 visant à réduire la pollution atmosphérique, mais aussi le premier choc pétrolier de 1973 et l’inflation de l’essence qui s’en suit, incitent les autorités américaines à soutenir le développement du covoiturage. Cela inspire alors l’ouverture, en 1976, de la première VR2+ en Californie, où les bus sont aussi autorisés (Billheimer, 1978). Cette voie était surnommée *diamond lane* en raison de sa signalisation horizontale présentant une macle, symbole qui se retrouve encore de nos jours lorsqu’une VR2+ est indiquée, par exemple sur le panneau expérimental de signalisation proposé en France (cf. figure 1.4). Les projets de VR2+ se multiplient ensuite aux États-Unis, avant d’atteindre, dans les années 1990, l’Australie, le Canada et l’Europe (Schijns et Eng, 2006 ; Ballet et Clavel, 2007 ; Rousic *et al.*, 2018), principalement le Royaume-Uni et l’Espagne (Guitton, 2022), puis donc la France à la fin des années 2010. D’autres configurations de déploiement sont d’ailleurs implicitement permises par la souplesse de l’article 35 de la LOM, qui n’impose aucune contrainte spécifique sur la modification de la voirie. Ainsi, sont à l’étude actuellement en France les déploiements (de Wissocq *et al.*, 2021a) :

- de VR2+ par conversion de la voie rapide ;
- de VRTC par conversion de la bande d’arrêt d’urgence (BAU) conjointe à une VR2+ par conversion de la voie rapide ;
- de VR2+ par conversion de la voie rapide avec suppression de la BAU ;
- de VR2+ par conversion de la BAU.

Cependant, **dans toute la suite de cette thèse, on ne s’intéressera qu’aux configurations présentant des VR2+ poreuses par conversion de la voie rapide**, située à gauche en France.

Type de voie réservée	Ayants droit	Porosité (<i>i.e.</i> possibilité pour les ayants droit d'entrer sur/de sortir de la voie à tout instant)		Modification de la voirie	
		poreuse	non poreuse	création de voie	conversion de voie
VR2+	VOM, auxquels on peut ajouter, selon la sensibilité locale : — des VFE ou des taxis, même à vide; — des bus ou des cars	Daganzo et Cassidy (2008) ; Hans et Damas (2019)	Southworth et Westbrook (1985) ; Newman <i>et al.</i> (1988) ; Fuhs et Obenberger (2002)	Newman <i>et al.</i> (1988) ; Dahlgren (1998)	Billheimer (1978) ; Dahlgren (1998) ; de Wisocq <i>et al.</i> (2021b)
voie réservée aux transports en commun (VRTC)	bus ou cars uniquement	de Wisocq <i>et al.</i> (2021a)	Mateos <i>et al.</i> (2006)	Mateos <i>et al.</i> (2006)	Lenormand (2007) ; de Wisocq <i>et al.</i> (2021a)
voie <i>high-occupancy toll</i> (HOT)	— VOM ; — autosolistes propices à payer, à un péage, pour profiter de conditions fluides	/	Dahlgren (2002) ; Javid <i>et al.</i> (2021)	Dahlgren (2002)	Guensler <i>et al.</i> (2013)

TABLEAU 1.3 – Classification des voies réservées, sur autoroute, à vision de partage des mobilités, avec des références évoquant chaque possibilité de déploiement

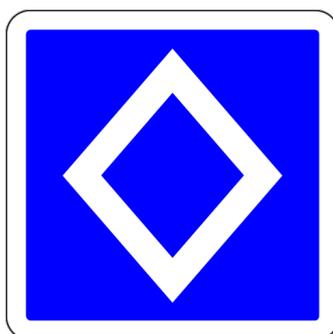


FIGURE 1.4 – Panneau de signalisation utilisé à titre expérimental pour indiquer une voie réservée en France, faisant figurer une macle. **Source** : arrêté du 24 août 2020 relatif à l'expérimentation d'une signalisation relative aux voies de circulation réservées à certaines catégories de véhicules sur certains axes

Plus souples quant à l'utilisation de la voirie en ce qu'elles ne modifient pas la chaussée, elles correspondent en effet au cas standard français de déploiement de voies réservées. L'utilisation de la voie rapide permet d'éviter que le parcours des VOM soit perturbé par les

mouvements des véhicules empruntant les bretelles présentes le long du linéaire, comme ce serait donc le cas sur la voie lente (Rousic *et al.*, 2020).

1.2.1.2 Objectifs visés et effets potentiels : de la tactique à la stratégie

Contrairement à d'autres stratégies de gestion du trafic autoroutier comme la régulation des vitesses (Smulders, 1990) ou la régulation d'accès aux bretelles d'entrée (Papageorgiou et Kotsialos, 2002), la visée du déploiement d'une VR2+ va au-delà de la régulation du trafic. Cette dernière se traduit par une modification de l'offre de l'infrastructure routière, induite par la répartition différente des véhicules sur les voies lorsque la VR2+ est activée. Cette modification vise, en induisant des conditions de trafic fluides aux utilisateurs de la VR2+ seulement, à inciter à un changement progressif de mode, ce qui revient à modifier la demande en transports. Ainsi, la performance d'une VR2+ doit être considérée à deux échelles temporelles.

Il y a d'abord l'échelle du *court terme*, c'est-à-dire celle de la minute, de l'heure, du jour ou encore de la semaine ; en somme, l'échelle de l'écoulement du trafic routier. Les objectifs sont alors (Hans et Damas, 2019 ; Rousic *et al.*, 2020) :

- de s'assurer que les covoitureurs gagnent du temps, ou tout du moins ressentent en gagner, en empruntant la VR2+ par rapport aux utilisateurs des VG ;
- dans le même temps, de maîtriser les niveaux de congestion, ce qui se traduit par le contrôle de la remontée de congestion sur les VG et sur la voirie en amont de la VR2+. C'est d'autant plus crucial lorsque la VR2+ est déployée en aval d'un nœud de trafic par lequel convergent des itinéraires en provenance des réseaux secondaires et communaux, la congestion pouvant alors s'y propager ;

Le court terme est donc une échelle *tactique*, en ce qu'en remplissant ces objectifs-ci, on s'assure que la VR2+ fonctionne de manière cohérente. Elle peut alors convaincre les automobilistes de changer de mode, ce qui est une étape nécessaire en vue de remplir les objectifs à long terme.

Il y a ensuite l'échelle du *long terme*, c'est-à-dire à celle du mois, de l'année, voire de la décennie. Les objectifs sont alors (Hans et Damas, 2019 ; Rousic *et al.*, 2020) :

- un report modal vers les mobilités partagées en vue d'une réduction du nombre de voitures individuelles en circulation, tout en augmentant le nombre de personnes transportées ;
- en conséquence, une réduction des émissions polluantes ;
- de viser une évolution des mentalités vers l'abandon de la voiture individuelle comme mode standard de déplacement, dont le report modal serait un signe.

Le long terme est donc une échelle *stratégique*, en ce qu'en remplissant ces objectifs-ci, on s'assure que le plan utilisé – le déploiement d'une VR2+ ici – est en effet utile pour participer à la transition écologique et sociale des mobilités.

Au-delà des objectifs, comme pour tout projet d'infrastructure routière, il faut garantir que le trafic ne soit pas trop dégradé en cas d'accident, ainsi que nous le rappelait Thomas Courbon quand nous l'avions interrogé. À plus long terme, il s'agit de s'assurer que la VR2+ ne soit pas accidentogène. Bien qu'elle soit performante si ses objectifs sont atteints, si cette solution ne permet pas d'assurer la sécurité autoroutière, alors elle ne saura pas être viable (Rousic *et al.*, 2020).

À partir des objectifs précédents et d'une revue de la littérature scientifique s'appuyant sur des retours d'expérience, d'observations empiriques, ou des modélisations réalisées analytiquement ou par la simulation, le tableau 1.4 synthétise les effets positifs et négatifs auxquels s'attendre en déployant une VR2+. Il faut noter que ces effets varient considérablement suivant le dimensionnement du projet, mais aussi le terrain d'étude et sa configuration :

la demande en trafic, l'offre de l'infrastructure, le taux d'occupation des véhicules, la longueur de la VR2+ ou encore la propension de la population à covoiturer (Cohen *et al.*, 2022).

Le tableau 1.5 présente, à la lumière de ces effets, les objectifs et points de vigilance des exploitants quant aux projets qui ont fait l'objet d'un entretien. Sa lecture montre que l'objectif principal de chaque déploiement est d'induire un report modal avec les externalités positives qu'il infère. La tactique utilisée s'attache principalement à s'assurer que le système routier, qui résulte de l'interaction entre l'infrastructure routière et ses usagers, ait une bonne réaction à l'activation d'une VR2+, c'est-à-dire en préservant des niveaux de congestion peu dégradés par rapport à la situation sans VR2+.

1.2.2 Principes de mise en œuvre d'une VR2+

Au vu du manque de recul inhérent à leur caractère inédit et aux enjeux de crédibilité quant à l'atteinte de leur performance, des mesures spécifiques encadrent le déploiement des VR2+ en France. Ces mesures influencent alors la manière dont ces voies sont activées.

1.2.2.1 Réglementation des VR2+ françaises

En France, des considérations de sécurité routière induisent une restriction sur la vitesse limite autorisée (VLA) sur les sections où les VR2+ sont activées. D'après les retours américains, elles se caractérisent en effet par un différentiel de vitesse potentiellement important entre la VR2+ et la VG la plus à gauche du fait de la différence de conditions de trafic expérimentées entre les types de voie (Thomson *et al.*, 2012 ; Lapardhaja *et al.*, 2021). Il n'est alors pas garanti, notamment dans le cas de l'insertion d'un VOM entré sur la section aménagée par une bretelle située en aval de l'entrée de la VR2+, que le changement de voie depuis la VG la plus à gauche vers la VR2+ soit réalisé en toute sécurité (Riou, 2019 ; Rousic *et al.*, 2020). D'une part, la distance de freinage des VOM circulant sur la VR2+ augmente avec leur vitesse. D'autre part, l'insertion depuis une VG se fait à vitesse réduite, ce qui incite les covoitureurs à être plus prudents au moment où ils identifient un véhicule s'insérant en aval. C'est ainsi que, sur recommandation du Cerema (Rousic *et al.*, 2020) et comme institué par l'arrêté du 24 août 2020, la VLA sur les tronçons où sont activées les VR2+ est fixée, sur l'ensemble de leurs voies :

- à 50 km/h sur les VSA, qu'elles soient initialement limitées à 90 ou 110 km/h ;
- à 70 km/h :
 - sur les VSA converties en boulevard urbain, la vitesse y étant alors déjà limitée à 70 km/h ;
 - sur les autres VSA en cas de dérogation qui peut être exceptionnellement accordée dans certains cas.

À l'étranger, où une telle baisse de la VLA n'est pas imposée à l'activation, les retours d'expérience relatifs à des VR2+ poreuses sur la voie de gauche (Martin *et al.*, 2004 ; Lee *et al.*, 2007 ; Jang *et al.*, 2009 ; Gitelman et Doveh, 2023) montrent que le nombre d'accidents, selon les sites, peut légèrement augmenter par rapport à la situation d'avant-projet. Ces accidents sont majoritairement localisés au niveau des interfaces, c'est-à-dire aux entrées et sorties de la VR2+, le nombre de changements de voie y étant plus élevé et pouvant provoquer davantage de collisions. Il est cependant important de remarquer que rien ne prouve encore, à partir de ces résultats, l'influence de la VLA sur ces accidents.

Il ne suffit pas, quand la VR2+ est activée, de baisser simultanément sa VLA. En effet, pour des raisons de sécurité là encore, l'article 178 de l'Instruction interministérielle sur la signalisation routière (IISR) impose des contraintes sur la VR2+ et ses sections voisines pour atteindre cette VLA, en stipulant que « les vitesses maximales autorisées sur la section

échelle	objectif de performance	effets positifs atteignables	effets négatifs possibles
court terme	gain de temps pour les co-voitureurs en période de pointe	<ul style="list-style-type: none"> — gain de temps de parcours moyen significatif par rapport aux autosolistes (e.g. +31,7 % (Martin <i>et al.</i>, 2004)) — augmentation du temps de parcours moyen de tous les véhicules tout en réduisant le temps de parcours moyen de tous les usagers (e.g. + 2% contre -10 % (Daganzo et Cassidy, 2008)) 	<ul style="list-style-type: none"> — gain de temps de parcours moyen peu attractif (e.g. 1'45" contre un objectif de 5' (Martin <i>et al.</i>, 2005)) — effet de friction (Lapardhaja <i>et al.</i>, 2021) : les covoitureurs circulant sur la VR2+ fluide n'osent pas rouler à la vitesse maximale autorisée lorsque les VG adjacentes sont congestionnées. Le différentiel de vitesse étant important, ces conducteurs préfèrent rouler moins vite pour leur sécurité
	maîtrise de la dynamique de la congestion induite par la répartition des flux entre VR2+ et VG	effet de lissage (Menendez et Daganzo, 2007 ; Cassidy <i>et al.</i> , 2010) : le débit des VG augmente par la diminution du nombre de changements de voie, du fait qu'il y en a une de moins pour les effectuer. Le débit observé y est alors supérieur à celui calculé et attendu, de 10 à 20 %	effet de compression (Daganzo et Cassidy, 2008) : la densité des VG est plus élevée à cause de la répartition de la file d'attente sur une voie de moins, ce qui fait qu'elle se propage plus vite. Elle peut alors atteindre des nœuds de trafic initialement non impactés
long terme	report modal	augmentation du taux d'occupation moyen (e.g. + 9 % en 10 ans (Skowronek <i>et al.</i> , 2002); + 10 % en 6 ans, (Gray <i>et al.</i> , 1995))	sous-utilisation chronique de la VR2+ amenant à sa conversion en voie HOT (Kwon et Varaiya, 2008) ou à sa fermeture (Cohen <i>et al.</i> , 2022)
	réduction des émissions de polluants	s'accroît avec l'augmentation du taux d'occupation moyen (Boriboonsomsin et Barth, 2007 ; Fontes <i>et al.</i> , 2014)	non documentés à notre connaissance

TABLEAU 1.4 – Effets potentiels induits par le déploiement d'une VR2+

	court terme		long terme
	objectif(s)	point(s) de vigilance	objectif(s)
A1 (Lille)	maintien des mêmes niveaux de congestion qu'avant déploiement	gestion des incidents	— proportion en VOM de 25 % — maintien ou diminution du nombre d'accidents
A48 (Grenoble)	(secondaire) gain de temps de 8' sur les 8 km de VR2+	remontée de congestion jusqu'à la barrière de péage de Voreppe	proportion en VOM au-delà des 15 % (situation avant déploiement), sans chiffre précis
A15 (Paris)	gain de temps de 5 à 10 minutes sur les 8 km de VR2+ pour les VOM	remontée de congestion jusqu'aux bretelles d'entrée connectées au réseau communal	augmenter la proportion en VOM, sans chiffre précis
M6 / M7 (Lyon)	pas d'objectif annoncé	niveaux de congestion élevés	diminuer le nombre de voitures en circulation de 115 000 à 50 000 véh/jour

TABLEAU 1.5 – Objectifs et points de vigilance des projets de VR2+ liés aux entretiens menés. Tableau obtenu à partir des entretiens et complété à partir de (Guillon, 2022 ; Glasson, 2023)

à réguler peuvent être réduites temporairement par paliers de 10 km/h ou de 20 km/h. Le palier de dégressivité ne doit pas être supérieur à 20 km/h sur deux panneaux successifs ou, dans le temps, sur un même panneau. »⁴ La figure 1.5 illustre le résultat de ces contraintes. Une stratégie temporelle, section par section, d'abaissement de la VLA (AVLA) est alors à penser conjointement au déploiement de la VR2+.

L'autre volet lié à la réglementation est davantage la conséquence d'une vision régaliennne et stratégique. L'État, en profitant de la promulgation de la loi climat et résilience du 22 août 2021 issue des travaux de la Convention citoyenne pour le climat (CCC), a souhaité accélérer et faciliter le déploiement des VR2+ sur les VSA du réseau national non concédé. Les démarches de déploiement et d'évaluation sont alors standardisées sur la base de guides édités par le Cerema (de Wissocq *et al.*, 2021b, 2022). Comme l'indique Mathieu Luzerne, l'étude d'un tel déploiement doit être abordée par les DIR dès lors qu'une VSA dessert une zone à faibles émissions mobilité (ZFE-m), où les véhicules les plus polluants ne peuvent plus circuler. Autour de telles voies, dites CCC, l'objectif est d'alimenter une doctrine nationale alors normalisée, dont la visée est de participer à la prise de décision sur la marche à suivre en matière de développement du covoiturage après 2024, comme l'indiquent les experts du Cerema. Ces voies sont expérimentales et devraient être complètement désactivées après cette date. En 2022, une dizaine de projets était ainsi en cours de déploiement aux six coins de l'hexagone selon Pascal Glasson. Ce nombre devrait augmenter d'ici fin 2023, date de fin des expérimentations, avec l'aide de l'État via le fonds vert.

4. Source : <https://equipementsdelaroute.cerema.fr/versions-consolidees-des-9-parties-de-l-a528.html>

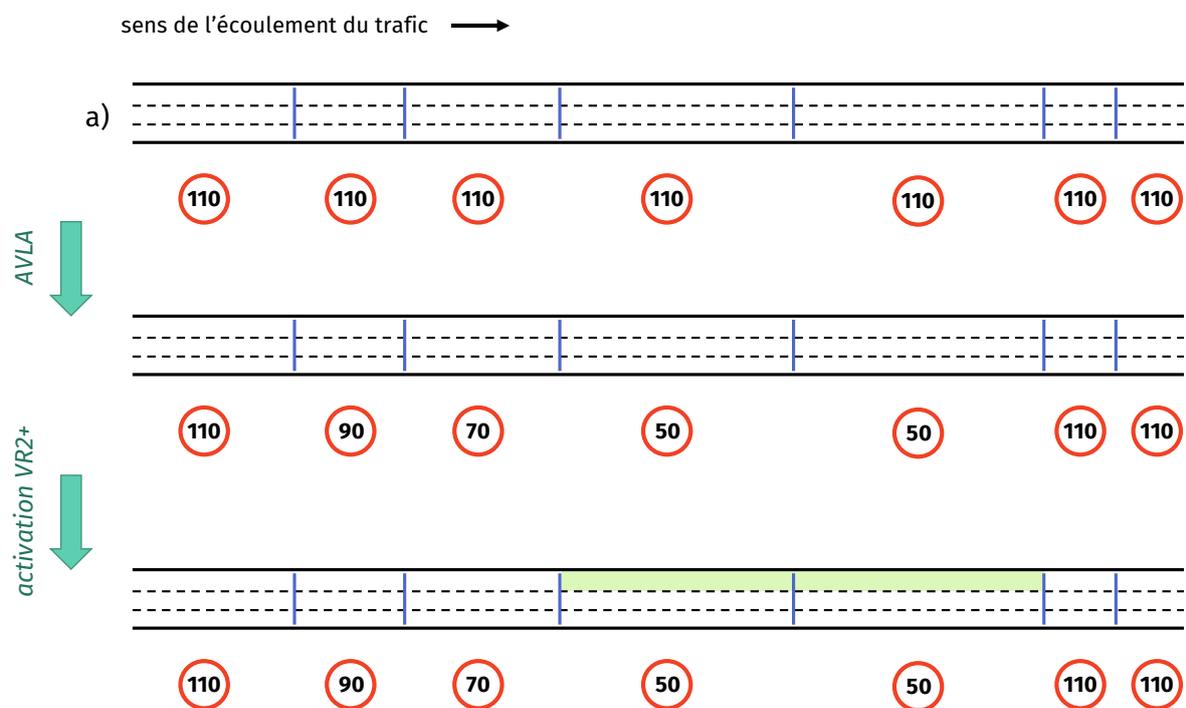


FIGURE 1.5 – Illustration de l'AVLA préalable au déploiement d'une VR2+ à partir d'une autoroute limitée à 110 km/h : a) situation de départ b) résultat de la stratégie. La VR2+ sera déployée sur les 3^e et 4^e sections et limitée à 50 km/h

1.2.2.2 Principes d'activation et de désactivation

Les conditions d'activation et de désactivation des VR2+ se divisent en deux modalités :

- la modalité *statique*, la VR2+ étant alors activée à heures fixes et déterminées. On distingue alors :
 - l'activation permanente, comme c'est le cas à Lyon sur la M6 et la M7 ;
 - l'activation temporaire ou prédéterminée, sur une plage de temps donnée et pour des jours donnés, par exemple de 6h00 à 10h00 en semaine. Cette modalité est par exemple pratiquée aux États-Unis, où elle est parfois improprement dénommée « dynamique » (Blume, 1998 ; Menendez, 2006) du fait de son caractère temporaire. Elle est aussi pratiquée en France, notamment pour des voies CCC (de Wissocq et al., 2021b). Elle l'est aussi pour d'autres projets comme celui de l'A15 ou bien de l'A1 dans un premier temps, la DIR Nord visant d'ici fin 2023 une modalité adaptative ;
- la modalité *adaptive*, la VR2+ étant activée non plus suivant des critères temporels, mais suivant le dépassement de seuils opérationnels. À notre connaissance, cette modalité est spécifique à la France et n'a pas été étudiée dans d'autres pays. Il est cependant à noter qu'une telle modalité existe aux États-Unis pour les voies HOT, en accordant l'accès à la voie tant qu'elle n'est pas congestionnée (Zhang et al., 2008, 2014). Pour les VR2+ françaises, les seuils opérationnels dépendent des objectifs fixés par l'exploitant (Hans et Damas, 2019) et s'appuient sur la caractérisation de l'état du trafic, mesurée par des capteurs placés en amont ou en aval de la VR2+. Ainsi, François Jeanjean informe que la VR2+ de l'A48 est activée lorsque la vitesse en aval passe sous la VLA de 50 km/h, reflétant l'installation de la congestion. Le seuil de désactivation correspond à un retour du taux d'occupation concordant avec des conditions fluides, toujours en aval.

Ces éléments, associés à ceux sur les VLA, permettent de dégager le déroulé temporel suivant

pour l'activation d'une VR2+ française avec une modalité statique prédéterminée (resp. une modalité adaptative) :

1. une fois le seuil temporel (resp. opérationnel) d'activation dépassé, la stratégie d'AVLA se déroule;
2. une fois la VLA réglementaire imposée sur toutes les sections accueillant la VR2+, celle-ci est activée;
3. une fois le seuil temporel (resp. opérationnel) de désactivation dépassé, la VR2+ est désactivée et les VLA des différentes sections reviennent à leurs valeurs nominales.

Le choix entre une modalité d'activation statique ou adaptative dépend essentiellement de la politique de l'exploitant quant au développement de la pratique du covoiturage du quotidien. Alors qu'elles devaient être activées avec une modalité adaptative (Adam, 2019), les VR2+ sur M6 et la M7 le sont finalement de manière statique et permanente, sous l'impulsion de la majorité politique métropolitaine élue en juin 2020. L'idée est de se montrer volontariste quant à la promotion des mobilités partagées en garantissant ainsi lisibilité et visibilité pour la VR2+ afin qu'un maximum d'utilisateurs aient conscience de son existence.

S'il s'agit d'activer la VR2+ en fonction des conditions actuelles de trafic, la modalité d'activation adaptative représente sans équivoque, pour les experts du Cerema, la meilleure alternative. Cela peut aider, bien que ce soit une vision contraire à celle avancée par la Métropole de Lyon, à l'acceptabilité de la mesure par les usagers puisque la VR2+ ne s'active alors qu'en périodes congestionnées. En conséquence, contrairement à la modalité statique et prédéterminée, elle évite d'avoir à définir une plage temporelle d'activation, difficile à déterminer si on veut qu'elle couvre tous les jours la durée de la période de pointe. En général, la congestion débute, d'un jour à l'autre, à la même heure, mais son heure de fin peut fortement varier d'un jour à l'autre (Wunderlich *et al.*, 2018).

Ces modalités d'activation de la VR2+ sont couplées à deux possibilités quant à la gestion :

- une gestion *statique*, où les utilisateurs sont prévenus de l'activation de la VR2+ et des éventuels changements de vitesse via une signalisation fixe. Elle est évidemment incompatible avec une modalité d'activation adaptative;
- une gestion *dynamique*, où les utilisateurs sont cette fois prévenus de ces changements via des PMV, ce qui est le cas pour les quatre terrains liés aux entretiens menés.

Enfin, notons qu'en cas d'évènement exceptionnel induisant un fonctionnement altéré avéré ou prévisible de la VR2+, la gestion dynamique permet une certaine souplesse. Par exemple, à Lyon, Pierre Soulard nous informait que le poste de contrôle peut rendre la VR2+ à la circulation générale :

- lorsque la congestion déborde sur le périmètre autoroutier non géré par le poste de contrôle;
- lorsqu'un accident neutralise une voie sur le tronçon d'activation de la VR2+;
- ou lorsqu'un accident ou une coupure de trafic sur un autre secteur du réseau peut induire un renvoi de trafic sur ce tronçon.

1.2.3 Acteurs impliqués et parties prenantes

L'étude des acteurs et parties prenantes liés au déploiement d'une VR2+ permet de montrer qu'un tel projet, pour qu'il fonctionne et emporte l'adhésion, doit être accepté par toutes ces parties.

1.2.3.1 Les acteurs et parties prenantes opérationnels dans la réalisation du projet

On a vu en partie 1.1.3 que le gestionnaire de police de la circulation, dit encore gestionnaire de la voirie, est autorisé par la LOM à réserver une voie. Il est ainsi l'autorité qui initie le projet de VR2+. Il s'agit :

- du préfet pour une section autoroutière située sur le réseau national non concédé ;
- du concessionnaire pour une section autoroutière située sous son autorité suivant un contrat de concession ;
- de la collectivité territoriale pour une section routière située sur son territoire et sous son autorité.

Pour un projet de déploiement de VR2+, le maître d'ouvrage (MOa) est aussi ce gestionnaire, sauf dans le cas où la section appartient au réseau national non concédé, auquel cas il s'agit de la DIR localement compétente.

Dans le cas des projets déployés sur le réseau national non concédé, il est possible que le choix de la section ne soit pas arrêté, ce qui a par exemple été le cas pour celui de l'A15. Ainsi, en tant que MOa, les DIR prennent préalablement le temps de concerter les élus locaux des départements et de la région concernés, pour connaître les besoins locaux en termes de projets de mobilité quant au covoiturage du quotidien. Cela permet aussi de pouvoir déminer d'éventuels conflits le plus tôt possible et d'obtenir des financements supplémentaires. Ce type de concertation n'a pas été mené à Grenoble, ni à Lyon, puisque les sections où les VR2+ allaient être déployées étaient déjà clairement identifiées.

Après cette éventuelle concertation, les études d'opportunité et de pré-faisabilité, détaillées dans la partie 1.3.1.1, sont menées pour juger de la pertinence du déploiement, sous le contrôle de la DGITM. Ces études sont généralement réalisées par la MOa, mais si l'expertise manque en son sein sur ces sujets, une assistance à MOa extérieure peut être sollicitée. Si le projet est jugé opportun par la DGITM, un marché public englobant toutes ses composantes, des travaux nécessaires sur la voirie à la communication externe, peut être lancé.

Lorsque les travaux sont terminés et que la VR2+ est déployée, son évaluation est réalisée pour s'assurer qu'elle réponde aux objectifs fixés. Au vu de son expertise sur l'évaluation des projets routiers et de son investissement sur le sujet des VR2+, le Cerema est convié à y participer ou bien à donner un avis si cette évaluation est réalisée par un prestataire extérieur, comme c'est le cas pour l'A48 (Delcampe, 2022). Il faut ajouter à ces acteurs la Délégation à la sécurité routière (DSR), au sein du Ministère de l'Intérieur, consultée pour l'évaluation des critères liés à la sécurité routière.

Enfin, parmi les parties prenantes, il convient de ne pas oublier les opérateurs du poste de contrôle. Ils se chargent de traiter les conditions exceptionnelles, notamment une désactivation imprévue de la VR2+. De plus, dans le cas d'une gestion dynamique de la VR2+, ils doivent s'assurer, au moment où le seuil d'activation (resp. de désactivation) est atteint, que les conditions de trafic et de sécurité permettent effectivement d'activer (resp. de désactiver) la voie, au moyen des caméras de surveillance à leur disposition. Les exploitants interrogés affirment que ce procédé s'est fait en co-construction avec ces opérateurs, tout au long du projet. Malgré tout, comme le relève Mathieu Luzerne, cette gestion dynamique de la VR2+ peut être très mal acceptée par les opérateurs. D'une part, cette tâche est un travail supplémentaire généralement réalisé à moyens constants. D'autre part, ils peuvent

se compromettre, puisqu'ils prennent la décision finale d'activer ou de désactiver la VR2+. La responsabilité d'éventuels accidents en découlant est alors la leur.

1.2.3.2 Les demandes et les pressions des politiques locaux et des usagers de la route

Pour les deux projets portés sur le réseau national non concédé dans les entretiens menés, la force politique, bien que motrice, se révèle sur certains points être un frein. En effet, du fait qu'il n'est pas spécialiste de la gestion routière, le décalage entre les attentes du préfet et la réalité du terrain peut être important. Il s'agissait davantage de déployer une VR2+ pour faire office d'exemple d'application de la LOM à l'échelle des Hauts-de-France et de l'Île-de-France. Ainsi, selon Mathieu Luzerne, il arrive souvent, lorsque les effets de la VR2+ sur le trafic lui sont présentés après la phase d'études préalables, que le politique refuse la solution proposée, alors qu'elle correspond pourtant à sa commande de départ. Ainsi, pour le projet de l'A1, le préfet des Hauts-de-France s'attendait à voir être déployée une VR2+ de 15 km alors que les études préalables conseillaient plutôt une longueur de 3 km pour éviter le franchissement de nœuds de trafic pouvant dégrader le bon fonctionnement de la VR2+. Selon François Jeanjean, cette volonté de certains politiques conduira, à terme, au déploiement de VR2+ ne respectant pas la totalité des critères techniques requis, les axes propices n'étant pas nombreux.

Cependant, à une échelle plus locale, certains politiques et usagers peuvent être complètement opposés aux projets de VR2+. Ce fut le cas sur l'A15, ce qui a abouti à l'annulation pure et simple du projet, alors que tous les travaux étaient réalisés (Ducouret, 2021). C'est déjà arrivé aux États-Unis (Billheimer, 1978) et aux Pays-Bas (Cohen *et al.*, 2022) aux débuts des VR2+ dans ces pays, mais une fois ces VR2+ déployées. Comme l'explique Christophe Desnouailles, les maires de communes avoisinant le trajet prévu sur l'A15, soutenus par la présidente de région, affirmaient que la prise de voie induite par la VR2+ allait impliquer une file d'attente plus longue et des reroutages vers le réseau communal local. Cela aurait résulté, selon eux, en une hausse de l'insécurité et des externalités environnementales liées au bruit et à la pollution. Bien que de telles externalités négatives aient été identifiées, l'étude de ces conséquences précises n'avait pas été faite en phase de projet. La DiRIF ne pouvant donc réfuter rapidement ces arguments politiques, la demande d'annulation formulée en 2021 auprès du Premier ministre a été acceptée. La DiRIF prévoit une requalification en VR2+ des voies dites olympiques, qui seront réservées, lors des Jeux Olympiques et Paralympiques de l'été 2024, aux athlètes, aux journalistes accrédités ou encore aux secouristes. Pour éviter une éventuelle protestation liée à ce projet, une consultation publique par voie électronique a été organisée en avril et mai 2023. Christophe Desnouailles estime ainsi qu'elle permettra de tenir compte, dans la réponse à d'éventuels opposants politiques, de l'avis des usagers en complément des arguments techniques.

Il est vrai qu'à la lecture des entretiens menés, les usagers de la route n'ont pas du tout été consultés en amont du projet. Ils le sont après, via des enquêtes témoignant d'une part de leur satisfaction, et d'autre part de leur compréhension de la mesure et de la signalisation, ce qui alimente ensuite les évaluations *a posteriori* et les retours d'expérience. Les usagers peuvent aussi être force de proposition. Ainsi, AREA a reçu, de la part de ses usagers covoitureurs, une demande de considération d'activation de la VR2+ les dimanches soirs, où l'A48 est congestionnée en raison des retours de week-end de grenoblois.

1.3 Du projet de VR2+ à son déploiement et à son suivi à court et à long termes

L'écosystème contextuel et opérationnel d'un projet de déploiement d'une VR2+ a été présenté dans les deux dernières parties. On se projette maintenant sur ce déploiement à proprement parler, de sa viabilité opérationnelle à son suivi du court au long terme pour s'assurer qu'il réponde aux objectifs fixés.

1.3.1 Préparation du déploiement

Une fois que l'axe où déployer la VR2+ est identifié, il faut s'assurer que le déploiement réponde aux objectifs à court terme afin d'assurer sa cohérence, qu'il soit compatible avec la configuration routière de l'axe et s'inscrive dans une logique économique et environnementale locale. Ceci est assuré par la réalisation d'une évaluation *a priori*, consistant en des études d'opportunité et de pré-faisabilité. Ces études préalables permettent donc, si elles sont correctement réalisées, d'assurer la viabilité du projet, au moins à court terme. Cette dernière ne pourra être véritablement constatée qu'une fois le déploiement effectif.

Cette évaluation, pour être exhaustive, doit comprendre plusieurs volets. L'impact du projet au niveau de l'écoulement du trafic, de la sécurité routière, de la possibilité financière et budgétaire, mais aussi au niveau de l'impact environnemental lié à l'aménagement. On s'intéressera ici, toujours dans une logique de comprendre la mesure de la performance d'une VR2+, essentiellement au volet relatif à l'écoulement du trafic dans la partie 1.3.1.1, avant d'aborder les aspects budgétaires dans la partie 1.3.1.2.

1.3.1.1 Évaluation *a priori* : opportunité et pré-faisabilité

Pour s'assurer de l'opportunité de la VR2+ en termes de performance, l'étude de trafic est réalisée à partir des éléments suivants, tirés de la doctrine du Cerema (Hans et Damas, 2019 ; de Wissocq *et al.*, 2021b), permettant d'aider les gestionnaires dans leur démarche :

- à partir de données de trafic récoltées sur le terrain, il faut s'assurer que l'axe choisi soit congestionné en période de pointe. Pour ce faire, il est recommandé de terminer la VR2+ en amont d'un point dur, sans pour autant le traverser. Un point dur coïncide généralement avec les discontinuités autoroutières que sont les convergents et les divergents (Marczak, 2014). Il faut aussi caractériser la congestion induite par ce point dur, en vérifiant qu'elle soit observée de manière récurrente et dure suffisamment longtemps;
- la détermination du potentiel de covoiturage, qui revient à obtenir la proportion de covoitureurs, est essentielle pour avoir toutes les données du problème. La répartition modale définissant le débit sur chaque type de voie, elle influe en effet directement l'offre du système lorsque la VR2+ est activée (Hans et Damas, 2019). Trois méthodes ressortent alors pour la déterminer :
 - le comptage des VOM directement sur l'axe, à la main par des observateurs au bord de la route, comme cela a été fait sur l'A1 et l'A15;
 - le comptage du nombre d'occupants à partir d'une détection réalisée par une caméra proche infrarouge (Artan *et al.*, 2016 ; Petitjean *et al.*, 2019). L'hétérogénéité des véhicules et celle de la morphologie des personnes à bord induisent des erreurs de mesure, qui s'atténuent cependant avec les évolutions technologiques;
 - une reconstitution de la demande à partir d'une analyse de données (Raballand et Laharotte, 2019 ; Veve, 2021) fournies par un prestataire, comme cela a été le cas pour la M6 et la M7 avec l'aide de l'entreprise IBM, qui s'est appuyée sur des

données FCD pour obtenir les matrices origine/destination du mode covoiturage dans la Métropole de Lyon ; ou pour l'A48 avec l'aide de l'entreprise Modality, qui a recoupé des sources de données diverses, notamment celles de l'Insee, comme nous l'a rapporté François Jeanjean ;

- les données du problème maintenant connues, deux paramètres spatial et temporel sont alors à faire varier pour étudier l'impact de la congestion résultante et s'assurer de sa maîtrise tout en garantissant un temps de parcours avantageux pour les covoitureurs. Le but est d'établir plusieurs scénarios de trafic avant de choisir celui aboutissant à la meilleure performance pour la VR2+ :
 - la longueur de la VR2+ ;
 - et, dans le cas d'une gestion à modalité statique prédéterminée, la plage horaire d'activation.

Quant à l'étude de la pré-faisabilité, elle repose sur celle de l'aménagement sur la voirie, ce qui induit l'analyse des profils en travers, de la visibilité ou des impacts sur la chaussée. Le positionnement des panneaux de signalisation est alors à étudier minutieusement, les emprises devant être suffisantes et les usagers devant avoir le temps de lire l'information qu'ils contiennent. Le panneau indiquant les ayants droit de la VR2+ est par exemple placé à 150 m de son début en raison du temps de lecture nécessaire pour intégrer le fait que la VR2+ est active tout juste en aval (Rousic *et al.*, 2020).

Comme le précisent Pascal Glasson et Mathieu Luzerne, le niveau de l'évaluation *a priori* dépend du type de projet. S'il s'agit de projets CCC à gestion statique, peu de données seront récoltées et il s'agira alors de déterminer grossièrement, de manière analytique, si les indicateurs calculés en termes de temps de parcours et de remontée de congestion ne sont pas alertants. L'avantage de ce type de voies est que l'annulation du projet est plus facile si des problèmes sont rencontrés sur le terrain une fois le déploiement effectué, le prix de la pose des équipements et des études étant moins élevé et les équipements faciles à retirer. Pour les autres types de projet, notamment ceux impliquant une gestion dynamique, il ne s'agit plus d'un pari puisque la voie est conçue pour durer, contrairement aux voies CCC qui n'ont pas vocation à être actives après 2024. Les études sont alors plus poussées, avec une récolte des données réalisée avec précaution pour pouvoir décrire fidèlement l'écoulement et l'affectation du trafic dans la situation d'avant-projet. Une étude en simulation dynamique peut être menée pour vérifier le fonctionnement sous plusieurs conditions d'utilisation. Elle peut ainsi permettre de tester l'influence d'autres paramètres que la longueur de la VR2+ et ainsi d'enrichir les scénarios évoqués plus haut : on peut par exemple penser à l'étude de l'influence du relèvement de la VLA à 70 km/h au lieu de 50 km/h pour appuyer auprès de la DGITM l'augmentation de ce seuil (Clairais, 2022).

L'évaluation *a priori* est alors incluse dans le dossier du projet, transmis à la DGITM pour validation. Cependant, des entorses à ce cadre d'évaluation peuvent exister. Elles sont illustrées par le déploiement des VR2+ sur la M6 et la M7 :

- la décision, survenue avant l'ouverture de ces VR2+, de passer d'une gestion dynamique à modalité adaptative à une gestion dynamique à modalité statique permanente, comme vu en partie 1.2.2.2 ;
- les VR2+ sont aussi déployées dans le sens sortant de Lyon. Sur la M7, cela se justifie par le fait que cet axe accueille, dans le cadre de sa requalification en boulevard urbain, de bout en bout une ligne de bus express. Ses bus circulent sur la VR2+ du fait de l'absence d'une bande d'arrêt d'urgence pour y déployer une VRTC. Par symétrie, le choix a alors aussi été fait de déployer une VR2+ dans le sens sortant pour la M6, puisque son activation n'y pénalise pas les covoitureurs. On retrouve alors l'argument de lisibilité

après des conducteurs et de cohérence invoqué pour l'activation permanente de la VR2+.

Pierre Soulard convient que ce parti pris engendre certainement une performance moindre, d'un point de vue opérationnel, que si les VR2+ avaient été activées de manière dynamique et que si celle en sens sortant de la M7 n'avait pas été déployée, ce qui a été noté par la DGITM. Cette dernière a cependant accepté ces entorses contraires aux principes de l'évaluation au vu de la volonté politique globale entreprise par la Métropole de Lyon en termes de développement du covoiturage.

1.3.1.2 Travaux à prévoir, leurs coûts et leur durée

Comme les VR2+ traitées ici sont déployées par prise de voie, les principaux travaux consistent à installer les panneaux de signalisation et de pré-signalisation, ainsi que les potences ou portiques prévus pour les soutenir, comme le prévoit l'arrêté du 24 août 2020. Il peut toutefois arriver que l'exploitant réutilise, dans le cas d'une signalisation dynamique, les PMV déjà présents sur la voirie. Les panneaux doivent être présents à chacune des entrées de la VSA donnant sur une section où la VR2+ est potentiellement activée et, sur la section courante, ils sont dans l'idéal placés tous les kilomètres. Dans le cas de l'installation de PMV, il faut prévoir de déployer des câbles d'alimentation d'électrique, ce qui nécessite des pelleteuses pour faire passer les câbles sous terre. Il faut aussi établir une liaison avec le poste de contrôle grâce à des caméras permettant aux opérateurs d'avoir une confirmation visuelle de la situation de trafic au moment d'activer ou de désactiver la voie. De telles caméras sont aussi utiles, lorsque l'angle de prise de vue est bon, pour les forces de l'ordre lorsqu'il s'agit de verbaliser les fraudeurs. Pour établir cette liaison, le déploiement de la fibre optique est nécessaire.

Le tableau 1.6 consigne le coût global, toutes taxes comprises, de chacun des projets de VR2+ liés aux entretiens, lorsqu'il nous a été communiqué. Les sources du financement sont aussi précisées. En effet, comme l'indique Thomas Courbon, les questions budgétaires représentent la principale contrainte liée au projet qui ne soit pas opérationnelle. C'est d'autant plus le cas que les coûts totaux, constatés en fin de projet, sont souvent supérieurs aux coûts budgétisés initialement.

Pour l'A48, les infrastructures de la VSP pré-existante ont été réutilisées pour le projet, sans quoi le coût aurait été bien plus élevé si le même déploiement avait dû être déployé *ex nihilo* à l'identique. Cela s'explique par le prix des caméras DAI (détection automatique d'incidents), déployées tous les kilomètres et utilisées pour analyser le trafic sur la section. Pour l'A15, les coûts moindres par rapport au projet lillois s'expliquent principalement par la réutilisation des PMV de l'infrastructure.

De manière générale, en comptant la totalité des travaux et études à mener, les experts du Cerema indiquent que le prix au kilomètre d'une VR2+ se situe entre 700 000 et 1,4 millions d'euros, hors taxes. Les coûts les moins élevés correspondent aux voies CCC, du fait qu'il n'y a pas d'apport d'électricité et que les études d'opportunité à mener sont moins poussées. Thomas Courbon affirme que le coût marginal du kilomètre de VR2+ est faible, du fait que l'apport initial (études à mener, coût de la main-d'œuvre, déploiement des pelleteuses) est plus coûteux en comparaison des travaux à mener pour un kilomètre supplémentaire, qui se limitent au déploiement de l'électricité et d'un éventuel PMV. Mathieu Luzerne indique enfin que l'aspect le plus coûteux des travaux consiste à les planifier de manière à minimiser les perturbations sur la circulation. La signalisation et le balisage temporaires ainsi que le fait de rémunérer le travail des employés de nuit expliquent alors de tels coûts.

Six mois de travaux d'installation, au moins, sont à prévoir d'après Pascal Glasson. Ils

	Coût global du projet (toutes taxes comprises, en millions d'euros)	Prix moyen au km (toutes taxes comprises, en millions d'euros)	Source des financements
A1 (Lille), budgétisé	7,5 : — 2,5 pour les études <i>a priori</i> et les travaux; — 5 pour les PMV et la conception de la stratégie d'AVLA	1,14	— État : 60 % ; — métropole de Lille : 25 % ; — région Hauts-de-France : 15 %
A48 (Grenoble), définitif	3 à 4	0,375 à 0,5	AREA-APRR : 100 %
A15 (Paris), définitif	4,5	0,53	État : 100 %

TABLEAU 1.6 – Coûts globaux et répartition du financement des projets de VR2+ liés aux entretiens

dépendent de la longueur du linéaire où est déployée la VR2+, de son niveau préalable d'équipements et des contraintes d'exploitation, notamment la possibilité de réaliser les travaux de nuit pour éviter de dégrader la circulation.

1.3.2 Évaluation *a posteriori* de la VR2+ et premiers retours d'expérience

Après le déploiement d'une VR2+, il faut être en mesure de quantifier et de qualifier ses effets pour vérifier si elle remplit ses objectifs à court et à long termes. Pour y parvenir, viser une compréhension et un respect importants, par les usagers, de la mesure est essentiel.

1.3.2.1 Principes de l'évaluation *a posteriori* : temporalité, indicateurs, préparation

En France, le déploiement d'une VR2+ s'accompagne à moyen et long terme d'un protocole d'évaluation *a posteriori*. Comme le rappelle l'arrêté du 24 août 2020, le déploiement d'une VR2+ reste une expérimentation, dans le sens où sa signalisation n'est pas encore inscrite dans le Code de la route. Son évaluation, ainsi que celle de la sécurité routière est donc imposée par cet arrêté, ce qui se traduit par des bilans annuels jusqu'au terme de l'expérimentation, après laquelle l'évaluation finale est produite. Elle permettra, toujours selon le même arrêté, d'alimenter une évaluation nationale du dispositif de VR2+ que le Cerema réalisera à horizon 2024, ce qui explique le rôle important de cette structure dans le jeu d'acteurs. Ainsi, indépendamment des objectifs fixés par les gestionnaires de VR2+, l'arrêté stipule que l'évaluation nationale devra au moins s'attacher à analyser les indicateurs suivants :

- au niveau de la sécurité routière :
 - l'accidentalité sur la section où la VR2+ est déployée, lorsqu'elle est activée et lorsqu'elle est désactivée;
 - les manœuvres des véhicules changeant de voie pour s'insérer sur la VR2+ ou bien pour en sortir, considérées comme « à risque »;
 - les vitesses du flot sur la VR2+ et sur la VG adjacente, pour y analyser le différentiel de vitesses;

- les débits sur la VR2+ et sur les VG;
- la compréhension du dispositif et de la signalisation par les usagers, ainsi que le respect de la mesure.

La seule évaluation des critères liés à la sécurité routière et à la compréhension du dispositif n'est pas suffisante pour évaluer l'atteinte des objectifs de la VR2+. Pour ce faire, les gestionnaires évaluent d'autres critères, qui font alors l'objet de retours d'expérience produits en parallèle des bilans d'évaluation. Par exemple, AREA évalue, sur l'A48, la maîtrise de la congestion grâce à la remontée de file d'attente, ainsi que le report modal grâce au taux de VOM dans le trafic et au taux d'occupation moyen (Delcampe, 2022). En parallèle, on a vu que l'un des buts des voies CCC était d'alimenter la doctrine nationale au niveau des VR2+. Pour y parvenir, un protocole d'évaluation *a posteriori* de ces voies a été produit (de Wissocq *et al.*, 2022), de sorte à faciliter et à standardiser leur évaluation. Ce protocole reprend et complète les critères et indicateurs apportés par l'arrêté du 24 août 2020. Ils placent concrètement la performance de la VR2+ au cœur de l'évaluation et ont l'ambition de caractériser le plus finement possible ses effets :

- sur le gain de temps pour les covoitureurs : les temps de parcours individuels, les débits cumulés;
- sur la maîtrise de la dynamique de la congestion : la remontée de file d'attente, les niveaux de congestion sur les axes parallèles à celui où est déployée la VR2+ s'il y a lieu;
- sur le report modal : le taux de remplissage des véhicules et donc la proportion en VOM;
- sur la dimension environnementale : une analyse du parc routier empruntant l'axe, la qualité de l'air par les émissions de polluants et, si possible, le bruit;
- sur l'acceptabilité : des entretiens avec des usagers de la route et avec les opérateurs de la route.

Ces indicateurs sont accompagnés d'une méthodologie pour les estimer et pour récolter les données nécessaires. Ainsi, comme l'indique Pascal Glasson, un tel protocole générique d'évaluation peut tout à fait être repris par tout gestionnaire voulant déployer une VR2+, même s'il ne s'agit pas d'une voie CCC.

Comme l'indiquent les experts du Cerema, les bilans finaux, que ce soit pour les évaluations des voies CCC ou pour les retours d'expérience des autres types de VR2+, permettront de définir les orientations données au covoiturage après 2024. En particulier, il s'agira de déterminer si les VR2+ continueront à être déployées. Le cas échéant, les VR2+ auront été jugées avoir le potentiel de participer à un report modal vers les mobilités partagées. Comme on l'a vu tout au long du chapitre, il faudra statuer sur certains principes ou bien les reprendre, comme la signalisation, les éléments de conception routière, le seuil de VLA ou les modalités d'activation et de désactivation.

1.3.2.2 Premiers retours d'expérience en France

Les VR2+ de Lyon et de Grenoble étant ouvertes depuis plus de deux ans à l'heure où les entretiens ont été menés, quelques résultats des premières évaluations, réalisées après un an, sont disponibles. Il faut cependant les prendre avec du recul, ces deux évaluations s'étant déroulées en 2021, année perturbée par des restrictions de déplacement et changements de comportements de mobilité induits par la pandémie de covid. Il en est de même avec celle de Strasbourg sur la M35, ouverte fin 2021 et évaluée en 2023 dans un contexte d'inflation, notamment des carburants. Les résultats sont donc donnés à titre indicatif. Parmi ces

résultats, on peut noter, pour le volet opérationnel (Duffy, 2021 ; Delcampe, 2022 ; Adeus, 2023) :

- au niveau du gain de temps pour les covoitureurs : sur l'A48, il est d'une minute pour 8 km, là où 8 minutes étaient visées ;
- au niveau de la maîtrise de la congestion : la file d'attente en période de pointe n'a pas évolué sur l'A48. Sur la M6 en sens entrant, elle se propage, en période de pointe du matin, 3,5 km plus loin en amont par rapport à 2019, sans toutefois atteindre le nœud de trafic par lequel convergent de nombreux axes secondaires ;
- sur le report modal : les caméras infrarouge montrent le passage du taux de VOM, sur l'A48, de 15 à 18 % en un an ;
- sur la sécurité routière : aucune sur-accidentalité particulière n'a été notée. Par exemple, le nombre d'accidents projeté sur les deux sens de la M6 (resp. M7) est de 249 (resp. 188) en 2021, contre 175 à 249 (resp. 113 à 174) les quatre années précédentes ;
- sur l'acceptabilité : 67 % des usagers réguliers de la M35 jugent inacceptable l'AVLA lié au déploiement de la VR2+, la VLA alors imposée de 70 km/h étant jugée incompatible avec le caractère autoroutier de l'axe.

1.3.2.3 Un dispositif pas toujours compris mais, surtout, pas respecté

Pour que le déploiement atteigne les objectifs fixés et fonctionne comme prévu dans les évaluations *a priori*, une hypothèse implicite est qu'il est compris et respecté par les usagers. Ce n'est cependant pas encore le cas trois ans après le déploiement des premières VR2+.

Pour aborder la compréhension du dispositif par les usagers, s'intéresser à la communication faite autour du projet est approprié. Au vu de leur récente arrivée, le symbole de la macle, ainsi que la signalisation associée à la réservation d'une voie, sont encore peu connus des usagers. Pour aider à leur compréhension, la communication a été soignée à Lyon et à Grenoble. Elle s'appuie sur différents supports, notamment des explications et des vidéos sur les sites internet des projets^{5 6} ou sur les réseaux sociaux, faisant passer les messages principaux : le principe et les objectifs de la VR2+, les conditions d'ouverture et la signification de la macle. À Lille, on compte suivre cet exemple en communiquant sur les mêmes thèmes notamment via la presse locale et des campagnes d'affichage en ville. Il est important, aussi, de correctement cibler les personnes touchées par la campagne de communication. Ainsi, à Grenoble, elle a été massifiée au nord de la métropole, car y résident le plus les personnes prenant potentiellement la VR2+, puisqu'elles vont travailler au centre-ville et emprunter l'A48 pour y aller.

La campagne de communication peut en partie expliquer qu'à Lyon, les premières évaluations de 2021 indiquent que la signalisation des VR2+ est comprise par 93 % des usagers de la route (Duffy, 2021). Au contraire, à Strasbourg, d'après les retours de Mathieu Luzerne, la communication autour de la VR2+ n'a pas été aussi importante. Les premières évaluations indiquent dans le même temps que seuls 57 % des usagers comprennent le panneau indiquant la VR2+ (Adeus, 2023). Ceci est à relier au fait que cette VR2+ est une voie CCC, ce qui implique une signalisation avec une multitude de panneaux et de panonceaux pour indiquer les ayants droits de la VR2+, la stratégie d'AVLA et les périodes auxquelles elles s'appliquent. Cette « forêt » de panneaux et de symboles ne facilite alors pas du tout la compréhension du déploiement.

Au niveau du respect de la mesure, les premières évaluations sont unanimes : le taux de non respect est très élevé. Ainsi, un peu plus de la moitié des utilisateurs de la VR2+ sont des

5. à Grenoble : <https://area-covoiturage.com/>

6. à Lyon : <https://www.grandlyon.com/services/voies-de-covoiturage-m6-m7>

autosolistes sur la M6 et la M7 (Duffy, 2021), tandis qu'ils sont 60 % sur l'A48 (Delcampe, 2022) et 70 % à Strasbourg (Adeus, 2023). Il est à noter que ces chiffres confondent, implicitement, les fraudeurs et les personnes qui n'ont pas compris le fonctionnement de la VR2+, donc qui, involontairement, ne respectent pas la consigne. Au regret de Mathieu Luzerne, l'anticipation de ces violations n'est pas intégrée dans les études préalables ; pourtant, les exploitants savent pertinemment qu'il y aura des fraudeurs ou des conducteurs n'ayant pas compris le fonctionnement de la VR2+. Cela peut créer un véritable décalage entre les conditions de trafic prévues par ces études et celles qui sont effectivement observées sur le terrain après le déploiement.

De tels taux s'expliquent par deux raisons. D'abord, l'amende forfaitaire plafonnée à 135 euros est considérée comme insuffisamment dissuasive par les exploitants et les experts, alors qu'elle peut atteindre 1000 dollars aux États-Unis (Derré, 2012). Ensuite, le contrôle des infractions ne peut pas encore être rigoureusement effectué car les radars dédiés ne sont pas encore déployés. Actuellement, la verbalisation est principalement réalisée par des patrouilles de CRS qui repèrent, arrêtent puis verbalisent les contrevenants. C'est le cas à Lyon, où elles avaient lieu, jusqu'à 2022 au moins, seulement une demi-journée par semaine. Cette méthode n'est donc pas efficace pour dissuader les fraudeurs en raison du temps nécessaire pour repérer, arrêter et verbaliser un seul véhicule. La seule approche pour combattre la fraude consiste donc à faire de la pédagogie. En utilisant des radars à infrarouge, qui peuvent compter le nombre de personnes à l'intérieur d'une voiture, les PMV peuvent afficher un message demandant à la voiture en infraction de quitter la VR2+ en notant sa plaque d'immatriculation, comme cela se fait à Lyon.

Toutefois, une solution pourrait être introduite à partir du deuxième semestre 2023. Des radars de contrôle-sanction basés sur la vidéo-verbalisation automatique seront alors déployés sur dix sites de VR2+ en France, dont ceux qui ont fait l'objet d'un entretien, pour une expérimentation de deux ans (Bacelar *et al.*, 2023). Il s'agit cependant d'une expérimentation, puisque ni la législation autour de la définition de l'infraction commise par les autosolistes fraudeurs, ni celle régissant sa vidéo-verbalisation ne sont inscrites dans le Code de la route.

La contrainte principale de ces radars est la mobilisation des forces de police locales. D'abord, il existe un problème institutionnel. Comme le soulève Pierre Soulard, les collectivités territoriales autres que les communes ne disposent pas de leurs propres forces de police. Ces collectivités doivent alors négocier avec les communes de leur ressort territorial où les VR2+ sont déployées pour déléguer des policiers municipaux à la tâche de vidéo-verbalisation. Ensuite, les policiers doivent vérifier, avec les photos prises par les radars, s'il y a bien infraction pour pouvoir transmettre le procès-verbal à l'Agence nationale de traitement automatisé des infractions. Le système expérimenté n'est en effet pas automatisé. De ce fait, le processus de verbalisation peut prendre jusqu'à dix minutes. Cela reste néanmoins toujours plus rapide et pratique que la solution actuelle. L'objectif est ensuite de tendre vers l'automatisation du contrôle-sanction. Cela ne pourra aboutir qu'après le retour d'évaluation sur toutes les expérimentations nationales, si ses conclusions le valident.

1.3.3 Planification locale et synergie avec les infrastructures de services pour favoriser le report modal

Le développement du covoiturage participe à une stratégie plus globale d'abandon du mode voiture individuelle au quotidien. Le déploiement des VR2+ n'est, à cet effet, qu'un projet d'infrastructure routière parmi d'autres projets, davantage serviciels.

Il est nécessaire, comme on l'a vu le long de ce chapitre, de s'assurer que la VR2+ tienne son rôle à l'échelle du court terme en garantissant de meilleures conditions de trafic à ses

utilisateurs, tout en limitant les effets pénalisants sur le reste de la voirie. Cependant, son déploiement et son succès seuls sont insuffisants pour aboutir à un report modal, de l'avis de tous les experts et exploitants interrogés.

D'abord, assurer ce report modal sur un territoire donné ne peut se faire qu'en ayant une vision stratégique et globale de son système de transports (Rousic *et al.*, 2020), tenant compte des enjeux environnementaux et des motifs et modes actuels de déplacements. À cet effet, certains territoires se sont dotés de schémas directeurs d'agglomération pour la gestion du trafic, afin d'éviter de déployer des stratégies successives indépendamment les unes des autres. Le but est donc que ces stratégies soient cohérentes, axe par axe et au niveau du réseau de VSA. Mathieu Luzerne expose ainsi l'exemple du département des Bouches-du-Rhône, où plusieurs VRTC sont déployées sur l'axe Aix-Marseille en raison d'une offre en transports en commun importante. Le projet d'un déploiement d'une VR2+ a, quant à lui, été préféré pour l'axe Aubagne-Marseille, en raison notamment de la présence environnante d'une voie ferrée à fort cadencement rendant inutile le développement de lignes de bus.

Ensuite, cette vision globale doit s'accompagner d'une infrastructure robuste et fiable de services à destination des potentiels covoitureurs. Elle s'appuie sur les autres dispositions encouragées par la LOM et le PNCQ, notamment l'incitation financière proposée par les plateformes de mise en relation et saluée par les exploitants interrogés. Au-delà de cette considération financière, le sujet du développement des lignes et des aires de covoiturage est pris au sérieux à Lyon et à Grenoble. Sous la volonté de l'AOM locale, six lignes sont déployées à Grenoble. Elles sont organisées comme des lignes de bus, avec arrêts et dépôts, et trois d'entre elles empruntent la VR2+ de l'A48 (Guitton, 2022). Toutes desservent des communes de l'aire urbaine, participant à leur échelle à désenclaver des territoires pas ou peu desservis par les transports en commun. Un délai maximal de 15 minutes d'attente est garanti en période de pointe avant que le système ne fasse appel à une solution de secours (Syndicat mixte des mobilités de l'aire grenobloise, 2020). Le développement des aires a pour but d'accompagner le déploiement de ces lignes, mais aussi de faciliter l'accès aux solutions alternatives à la voiture individuelle. Ainsi, la Métropole de Lyon a ouvert en mars 2023 une aire de 42 places de parking sur la commune de La Tour-de-Salvagny, en amont de la VR2+ sur la M6, accessible aux piétons ainsi qu'aux cyclistes (Métropole de Lyon, 2023). Pour François Jeanjean, l'idéal serait de compléter cette multimodalité en déployant un arrêt de bus sur ces aires périphériques, en suivant l'exemple de Madrid, où de telles aires ont accéléré le développement des lignes de bus express (Broto, 2014 ; Guitton, 2022). L'exemple de l'ambition de ces deux métropoles françaises montre que le gestionnaire de la VR2+ et l'AOM, si ce sont deux entités différentes, doivent veiller à travailler conjointement pour que la synergie de la VR2+ avec les services proposés en appui du covoiturage soit optimale. En somme, le projet d'infrastructure doit rencontrer le projet serviciel, de sorte que les usagers disposent d'alternatives crédibles et complémentaires pour laisser de côté le mode voiture individuelle au quotidien.

Pour conclure, l'objectif est de tendre vers un service similaire à celui offert par un service de transports en commun et intégré de manière cohérente dans le système local de mobilités. Pierre Soulard appelle de ses vœux, à terme, le développement structurant de lignes avec leur grille horaire et leur tarification et des arrêts sur des aires multimodales. Il s'agit ainsi de faire vivre l'écosystème du covoiturage et la communauté associée. Comme le résumerait Mathieu Luzerne, pour accompagner le développement du covoiturage, « déployer une VR2+ est indispensable, [mais] le service est nécessaire. »

1.4 Conclusion du chapitre

Ce premier chapitre a permis de présenter un objectif stratégique global, celui du report modal de l'autosolisme vers des mobilités partagées au quotidien, dans un but de transition écologique et sociale. Cet objectif s'attache principalement aux aires d'attraction urbaines, les villes-centre et leur proche périphérie concentrant encore les principales activités, notamment le travail. Pour parvenir à cet objectif, le covoiturage courte distance est amené à se développer et à devenir une solution crédible grâce notamment à une législation plus souple à son égard. Cette dernière permet notamment le déploiement de VR2+, notamment sur les VSA aux portes des villes-centre. Leur objectif est alors de garantir de meilleurs temps de parcours aux utilisateurs ayant fait le choix de laisser de côté l'usage d'un véhicule individuel. En synergie avec d'autres leviers davantage serviciels, comme les incitations financières à covoiturer ou le développement des aires multimodales, elle vise à participer au report modal.

Ce chapitre a aussi permis de mettre en évidence les spécificités opérationnelles françaises liées au déploiement des VR2+. En effet, ce dernier s'accompagne d'un abaissement réglementaire de la VLA sur le tronçon où la VR2+ est activée, pour des raisons supposées de sécurité routière. Les exploitants ont aussi la possibilité d'activer la VR2+ de manière statique, c'est-à-dire à plages horaires fixes, ou bien de manière adaptative, c'est-à-dire suivant les conditions de trafic. L'impact de ces deux spécificités sur les temps de parcours, donc sur la performance d'une VR2+ au sens tactique du terme, sera étudié dans la partie III de la thèse. Auparavant, la partie II se focalisera sur l'impact du déploiement d'une VR2+ sur le trafic, ce qui permettra d'affiner et de valider l'usage des outils retenus pour réaliser l'évaluation de cet impact.

La logique ainsi exposée est résumée par la figure 1.6.

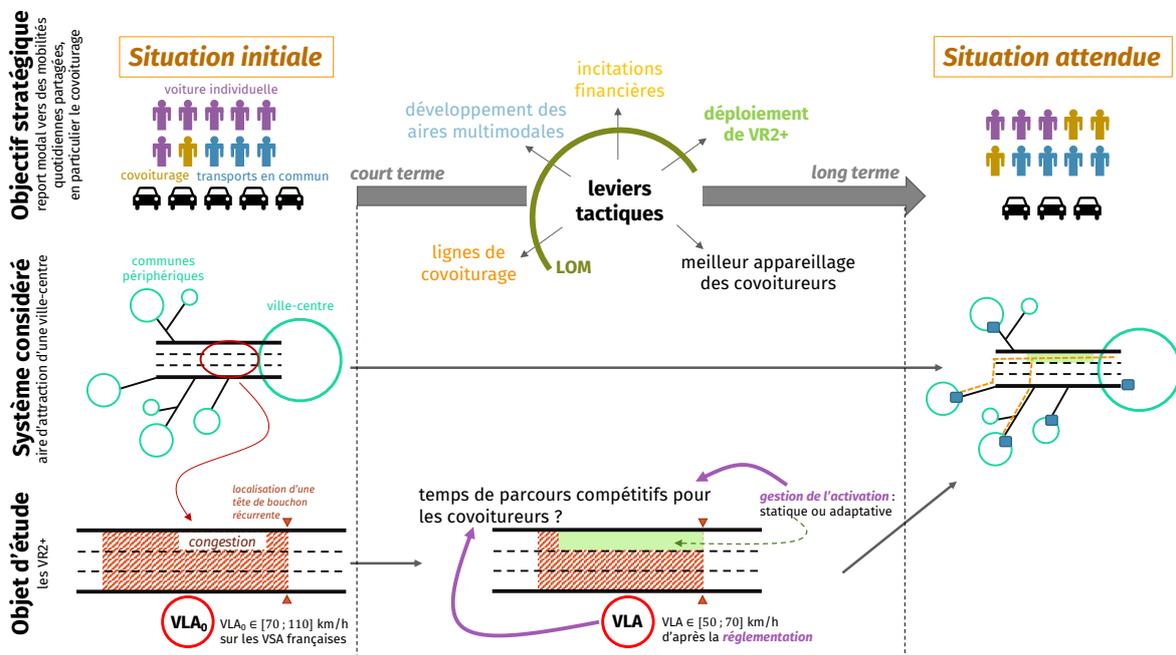


FIGURE 1.6 – Report modal vers des mobilités quotidiennes partagées sur le territoire français : enjeux du développement du covoiturage courte distance, liés à ceux du déploiement des VR2+. Les proportions modales initiales et attendues sont fixées à titre purement illustratif et arbitraire

Chapitre 2

Éléments de théorie du trafic

L'objectif de ce chapitre est de présenter les notions d'écoulement du trafic routier permettant d'aborder convenablement les enjeux et développements scientifiques des chapitres suivants. Il s'agit de connaître les approches permettant de caractériser et de modéliser dynamiquement les états de trafic, pour pouvoir les comprendre et les analyser. Ces approches permettent alors de prévoir et d'évaluer les systèmes de transports routiers, comme ce sera le cas dans le reste de la thèse.

La partie 2.1 s'intéresse à la modélisation analytique du trafic, tandis que la partie 2.2 s'attache aux méthodes plus pratiques, c'est-à-dire l'approche empirique ainsi que la simulation du trafic. Pour un exposé plus complet sur les sujets abordés dans ce chapitre, on pourra se référer aux ouvrages de [May \(1990\)](#), [Leclercq \(2009\)](#), [Buisson et Lesort \(2010\)](#), [Treiber et Kesting \(2013\)](#) ou [Laval \(2019\)](#), entre autres.

2.1 Du véhicule au trafic routier : vers la modélisation analytique de l'écoulement

Pour caractériser l'écoulement du trafic, il suffit, comme l'exposait [Moskowitz \(1965\)](#), de décrire l'évolution du nombre N de véhicules dans le temps et l'espace. De cette représentation découle une description de l'écoulement à deux échelles, microscopique et macroscopique.

2.1.1 Description à l'échelle microscopique

On se place d'abord à l'échelle la plus intuitive, celle du véhicule et donc de ses passagers. Tout comme une particule de fluide est une portion d'un fluide qui s'écoule, on peut considérer qu'un véhicule est une « particule » du trafic routier qui s'écoule sur la route, d'où que cette échelle est dite microscopique. En particulier, si l'on suit le mouvement d'un véhicule donné, ce qui est classiquement le plus pratique à cette échelle, on dit alors, par analogie avec la mécanique des fluides, que le trafic est caractérisé de manière lagrangienne.

Indexons ce véhicule par l'indice i . La caractérisation lagrangienne permet d'obtenir les variables microscopiques suivantes :

- celles liées à sa *cinématique* :
 - la position longitudinale x_i ,
 - la position latérale y_i , qui peut être intéressante si l'on étudie le mouvement sur les éventuelles différentes voies de la route ;
 - la vitesse longitudinale $v_i := \dot{x}_i$;
 - l'accélération longitudinale $a_i := \ddot{x}_i$;

- mais aussi celles liées aux *interactions* avec les autres véhicules du flot :
 - la distance intervéhiculaire $g_i := x_{i-1} - x_i$ avec le véhicule *leader* $i - 1$, situé devant, à un instant donné;
 - le temps intervéhiculaire h_i , *i.e.* le temps séparant le passage des véhicules $i - 1$ et i en un point donné.

La figure 2.1 schématise les trajectoires de véhicules et représente les variables longitudinales décrites ci-dessus. Afin de décrire cette cinématique et ces interactions, des modèles

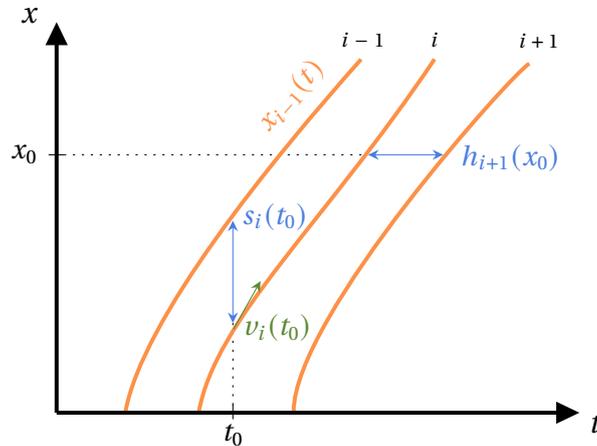


FIGURE 2.1 – Représentation schématique de trajectoires fictives de trois véhicules permettant d’identifier graphiquement les principales variables microscopiques

analytiques ont été développés :

- les *modèles de poursuite* cherchent à déterminer comment les véhicules se suivent longitudinalement;
- les *modèles de changement de voie* cherchent à décrire le comportement latéral des véhicules.

Enfin, l’hétérogénéité des conducteurs et des véhicules peut aussi être considérée dans les modèles. Elle concerne la manière dont les paramètres de trafic utilisés pour la modélisation peuvent varier d’un couple conducteur-véhicule à l’autre. Cette variabilité s’applique d’autant plus à l’échelle microscopique que les comportements des conducteurs et les caractéristiques des véhicules (longueur, capacité d’accélération, ...) sont différents de l’un à l’autre (Ossen et Hoogendoorn, 2011). Comme on le verra par la suite, le fonctionnement du trafic à l’échelle macroscopique résulte de l’agrégation des comportements individuels. La stochasticité que ces derniers induisent peut alors se traduire par des états de trafic sensiblement différents de ceux attendus. Cela peut expliquer des phénomènes tels que les chutes de capacité, l’hystérésis ou les ondes d’arrêt-redémarrage, dites encore ondes de *stop and go* (Laval et Leclercq, 2010 ; Chen *et al.*, 2014 ; Saifuzzaman *et al.*, 2017).

2.1.1.1 Les modèles de poursuite pour décrire les mouvements longitudinaux

Le comportement longitudinal du couple véhicule-conducteur est étudié suivant deux situations :

- celle où le véhicule est restreint par un autre devant lui et que le conducteur ne peut alors pas rouler à sa vitesse désirée;
- celle où, au contraire, le véhicule expérimente des conditions de trafic fluides et que le conducteur cherche alors à rouler à la vitesse désirée.

Divers critères permettent de caractériser la manière dont le couple conducteur-véhicule réagit au mouvement du véhicule *leader*, ce qui explique qu’on puisse regrouper ces modèles

de poursuite suivant différentes catégories (Brackstone et McDonald, 1999 ; Saifuzzaman et Zheng, 2014).

L'approche la plus intuitive consiste à caractériser cette poursuite du point de vue du conducteur, c'est-à-dire adopter une approche psychophysique. Pour ce faire, la catégorie des *modèles à facteurs humains* prend en compte des attributs tels que les caractéristiques socio-économiques, l'agressivité, la sensibilité au style de conduite ou le champ de vision, qui sont directement liés au conducteur (Hamdar, 2012). Certains de ces modèles combinent différents seuils de perception psychophysiques liés à ces facteurs pour expliquer le déclenchement de l'accélération ou de la décélération du véhicule (Wiedemann, 1974 ; Fritzsche, 1994). D'autres s'appuient plutôt sur l'angle de vision et sur le fait que les êtres humains évaluent mieux les changements angulaires que les distances longitudinales (Andersen et Sauer, 2007 ; Jin *et al.*, 2011). Enfin, certains modèles prennent en compte les imperfections de la conduite, en particulier l'état physiologique du conducteur, par exemple la fatigue et la distraction (van Winsum, 1999 ; Yang et Peng, 2010).

La prise en compte de tous les facteurs humains est cependant complexe et laborieuse. C'est pourquoi une autre catégorie de modèles considère que le comportement humain est incorporé dans les équations cinématiques du véhicule. C'est la catégorie des *modèles phénoménologiques*. Parmi eux, on peut citer les premiers modèles de poursuite développés, ceux de réponse-stimulus (Chandler *et al.*, 1958 ; Gazis *et al.*, 1961). Ils tendent à décrire l'accélération résultante du véhicule comme une réponse à un stimulus, qui correspond au changement de vitesse relative par rapport au véhicule *leader*. D'autres modèles considèrent que chaque véhicule cherche à atteindre la vitesse souhaitée tout en maintenant une distance suffisante avec le véhicule qui le précède, afin d'éviter un accident si ce dernier freine brusquement : ce sont des modèles à distance de sécurité, dits encore d'évitement d'accident (Kometani et Sasaki, 1959 ; Gipps, 1981). Enfin, les modèles à vitesse optimale visent à adapter la vitesse du véhicule en fonction de sa distance et de la vitesse relative avec le véhicule de devant (Bando *et al.*, 1995 ; Davis, 2003).

Il n'est cependant généralement pas trivial d'établir la formulation macroscopique d'un modèle de poursuite qui soit basé sur des facteurs humains ou qui soit phénoménologique. Dit autrement, il est difficile de comprendre les conséquences des facteurs comportementaux sur le fonctionnement global et agrégé du trafic, fonctionnement qu'on exposera dans la partie 2.1.2. C'est pourquoi Newell (2002) a proposé un *modèle à loi macroscopique*, qui résout explicitement, en coordonnées lagrangiennes, le modèle d'écoulement de Lighthill, Whitham et Richards (LWR) exprimé sous une forme triangulaire, qui sera exposé dans sa forme macroscopique dans la partie 2.1.2.1. La formulation proposée exprime la distance intervéhiculaire du véhicule comme une fonction de sa vitesse longitudinale.

2.1.1.2 Les modèles de changement de voie pour décrire les mouvements latéraux

Les modèles de changement de voie déterminent la manière dont les véhicules se déplacent latéralement. On distingue alors deux types de manœuvres (Marczak, 2014 ; Zheng, 2014) :

- les changements de voie *obligatoires* (CVO), effectués lorsque le conducteur doit changer de direction pour continuer son itinéraire et s'assurer de rejoindre sa destination. C'est par exemple le cas lorsqu'un véhicule doit emprunter une bretelle de sortie sur une autoroute ;
- les changements de voie *discrétionnaires* (CVD), effectués lorsque le conducteur considère que les conditions de circulation sur la voie cible sont plus avantageuses que celles sur sa voie actuelle. C'est par exemple le cas lorsqu'un camion se trouve devant le véhicule, que ce dernier cherche alors à dépasser.

Puisque les CVD sont déclenchés à la discrétion du conducteur, on retiendra que leur modélisation dépend de paramètres qui diffèrent d'un conducteur à un autre. Ces paramètres étant eux-mêmes différents suivant le modèle développé (Nie *et al.*, 2016 ; Li *et al.*, 2023), cela traduit la complexité à modéliser cette catégorie de changement de voie. L'incitatif principal semble tout de même être la différence de vitesse entre la voie actuelle et la voie cible, le CVD vers cette dernière étant davantage probable que la vitesse y est plus élevée (Laval et Leclercq, 2008).

Quant aux CVO, certains modèles reposent sur la théorie des jeux, où le processus décisionnel est principalement basé sur le risque d'accident, et quelques autres modèles sur des choix discrets (Marczak, 2014). Toutefois, la plupart des modèles existants s'appuient sur la théorie d'acceptation de créneaux (Michaels et Fazio, 1989 ; Lee, 2006 ; Barceló, 2010 ; Marczak, 2014). Selon cette théorie, si le créneau d'insertion offert au conducteur est supérieur au seuil spécifique à ce dernier, c'est-à-dire qu'il est suffisamment important pour garantir une manœuvre dont le conducteur juge qu'elle sera effectuée en toute sécurité, alors le changement de voie est réalisé.

2.1.2 Description à l'échelle macroscopique

2.1.2.1 Caractérisation analytique de l'écoulement du trafic

À l'échelle macroscopique, on assimile l'ensemble des véhicules constituant le trafic routier comme un fluide s'écoulant le long de l'infrastructure. Pour caractériser cet écoulement, il est, classiquement, plus pratique de l'observer depuis une position fixe du réseau. Sur ce dernier point, par analogie avec la mécanique des fluides, on dit alors que le trafic est caractérisé de manière eulérienne.

L'agrégation des comportements et interactions individuels caractérise cet écoulement. Cette résultante est alors appréciée suivant trois variables macroscopiques :

- le débit $q := \partial N / \partial t$, qui est le nombre de véhicules passant par unité de temps en un point donné du réseau ;
- la densité, ou concentration, $k := -\partial N / \partial x$ ¹, qui est le nombre de véhicules présents par unité de longueur à un instant donné ;
- la vitesse du flot v , qui est la vitesse moyenne spatiale, c'est-à-dire la vitesse moyenne des véhicules présents par unité de longueur à un instant donné.

On peut démontrer que $v = q/k$ (Gerlough et Huber, 1975), donc que ces trois variables macroscopiques sont liées. Il suffit donc, pour caractériser les états de trafic à l'équilibre, de déterminer une relation, dite fondamentale, entre deux de ces variables. Classiquement, c'est la fonction $Q : k \mapsto q$ qui est étudiée. En effet, Lighthill et Whitham (1955) et Richards (1956) ont alors montré, en supposant que Q est concave, que le principe de conservation du nombre de véhicules N – aucun véhicule n'est créé ou détruit subitement, ce qui est une hypothèse raisonnable – se ramène au problème hyperbolique 2.1, qui est à la base du modèle analytique LWR :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial Q(k)}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

Plusieurs fonctions sont possibles pour définir Q , comme une fonction gaussienne, quadratique ou encore linéaire par morceaux. L'essentiel est que la formulation choisie soit physiquement cohérente, c'est-à-dire que le débit soit nul quand la densité est nulle – il n'y a personne sur la route – et quand la densité est maximale – les véhicules occupent toute la route et ne peuvent plus avancer –. La fonction qui sera utilisée pour le reste de cette

1. Le signe vient du sens de circulation des véhicules : le nombre de véhicules cumulés est plus élevé en amont qu'en aval

thèse est la formulation triangulaire 2.2 proposée par Newell (1993b) et représentée sur le diagramme fondamental de la figure 2.2 pour une route à n voies.

$$q = Q(k) = \min(uk ; w(k - n\kappa)) \quad (2.2)$$

En plus d'être simple, cette formulation est la plus cohérente avec les observations empiriques (Leclercq, 2009 ; Buisson et Lesort, 2010), notamment en congestion puisqu'il a été montré que la valeur de w était constante pour un terrain donné (Chiabaut *et al.*, 2009, 2010).

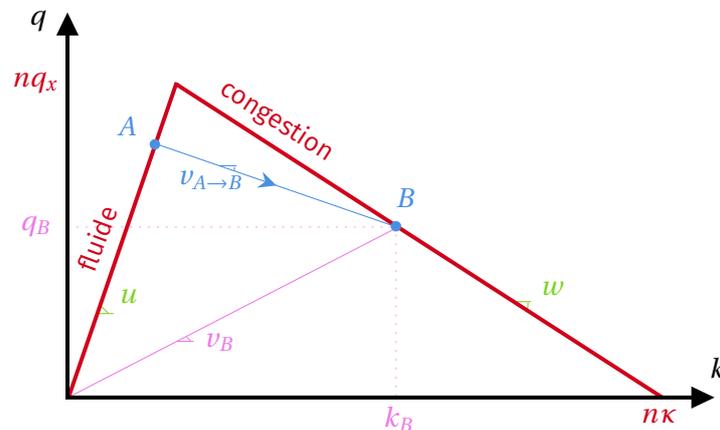


FIGURE 2.2 – Diagramme fondamental triangulaire pour une route à n voies

La figure 2.2 montre donc le diagramme fondamental sous sa forme triangulaire. Du fait de la concavité de Q , deux parties apparaissent :

- une partie où le débit croît avec la densité et qui caractérise les états de trafic fluides. Le flux de trafic circule alors à la vitesse libre u . Cette caractérisation fluide se tient jusqu'à ce que la densité atteigne une valeur critique telle que le débit maximal nq_x , encore appelé capacité, soit atteint ;
- lorsque la densité est comprise entre cette valeur critique et sa valeur maximale $n\kappa$, on entre alors dans la partie caractérisant les états de trafic congestionnés, où le débit décroît avec l'augmentation de la densité. Elle se spécifie, pour un diagramme triangulaire, par la pente w correspondant à la vitesse maximale de remontée de congestion. Le flux de trafic circule à la vitesse q/k , qui décroît donc elle aussi avec l'augmentation de la densité.

Résoudre le modèle LWR revient à déterminer comment se propagent les états de trafic de manière spatio-temporelle. Cela permet alors d'obtenir analytiquement des indicateurs très utiles pour quantifier la congestion, comme la longueur de la remontée de file d'attente. Le fait que N soit une grandeur conservative permet de montrer qu'un état de trafic B se propage sur un autre état de trafic A à la vitesse :

$$v_{A \rightarrow B} = \frac{q_B - q_A}{k_B - k_A} \quad (2.3)$$

Cette formule, dite de Rankine-Hugoniot, donne donc la vitesse de l'interface entre les états A et B . Elle est illustrée sur la figure 2.2.

Un dernier outil analytique découlant du modèle LWR et de la lecture de la courbe de Moskowitz, qui décrit l'évolution de N en fonction du temps et de l'espace, est l'utilisation des courbes de véhicules cumulés (CVC). En un point donné du réseau, cette utilisation permet de remonter à des informations intéressantes en situation congestionnée, comme les retards subis et le nombre de véhicules dans la file d'attente à un instant donné. Pour y parvenir, on distingue deux CVC :

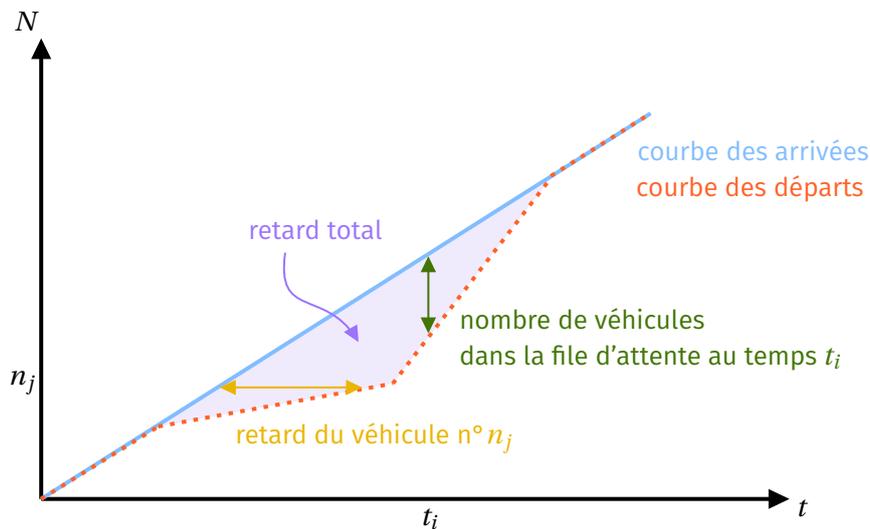


FIGURE 2.3 – Utilisation des CVC en un point donné d'un réseau, illustrée pour le cas d'une congestion simple d'offre

- la courbe des arrivées donne l'évolution du cumul de véhicules voulant passer par le point considéré, sa pente donnant alors la valeur de la demande en cette position;
- la courbe des départs donne l'évolution du cumul de véhicules passant effectivement par ce point, sa pente donnant alors la valeur du débit en cette position. C'est donc la courbe véritablement observée sur le plan de coupe (N, t) de la courbe de Moskowitz, la courbe des arrivées n'y étant superposée qu'*a posteriori* pour les besoins de la modélisation.

Si l'on connaît les débits de demande et les débits effectifs en un point donné du réseau, on a effectivement accès aux informations sur les retards et sur le nombre de véhicules dans la file d'attente, comme l'illustre la figure 2.3. La différence entre le cumul de véhicules des arrivées et celui des départs donne, à un instant donné, le nombre de véhicules dans la file d'attente. L'aire entre les deux CVC donne alors le retard total. Il est dit total dans le sens où il agrège celui de tous les véhicules sur l'ensemble de la période considérée.

2.1.2.2 Extension aux discontinuités autoroutières

Les divergents et les convergents sont deux types de discontinuités présentes sur les autoroutes, aux bretelles de sortie et d'entrée. Ces discontinuités seront étudiées tout au long de cette thèse, ce qui mérite de présenter ici leur fonctionnement.

2.1.2.2.1 Modélisation des divergents autoroutiers

Depuis une voie en amont, un choix entre la voie 1 et la voie 2 de capacités, en sortie, potentiellement différentes est proposé aux conducteurs, une proportion β d'entre eux choisissant la voie 1, cf. figure 2.4(a).

Comme il y a deux voies en aval et une seule en amont, il est crucial de savoir établir la propagation des états de trafic. En effet, si l'une des voies est congestionnée, la congestion peut remonter jusqu'à la voie en amont. Pour déterminer les débits effectifs dans un tel cas, Newell (1993a) a proposé la règle du *first in, first out* (FIFO). Elle stipule que l'ordre d'apparition des véhicules au point de divergence est le même que celui en amont de ce point, soit encore que les temps de parcours en amont de ce point sont les mêmes, quelle que soit la destination. Un outil graphique décrivant le fonctionnement du trafic pour un divergent et intégrant la règle du FIFO, que l'on appellera par la suite diagramme de divergent, est

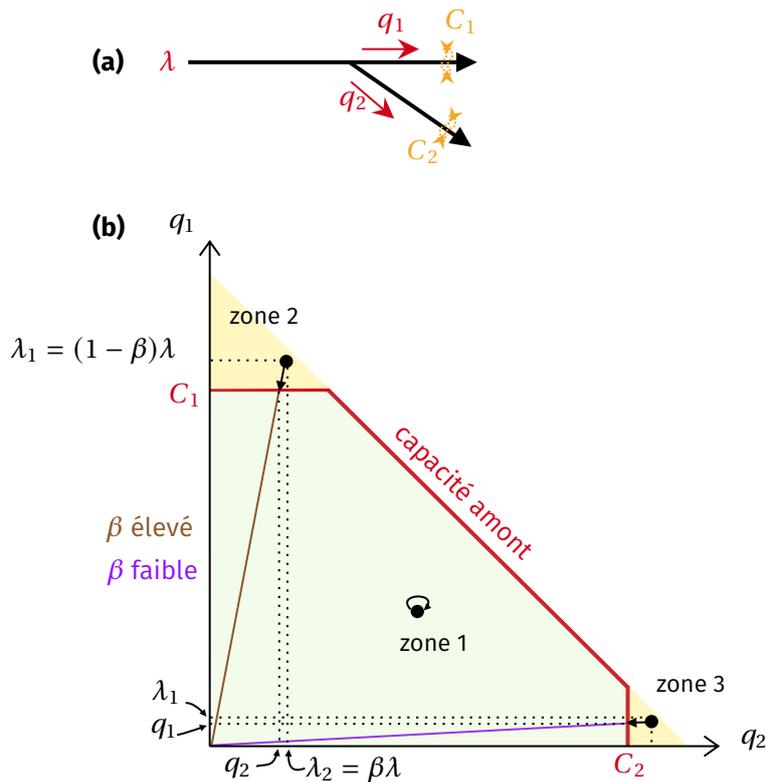


FIGURE 2.4 – Représentation d’un divergent ponctuel (a) et du diagramme de divergent permettant de visualiser graphiquement les états de trafic (b). Inspiré de (Ancelet et Hans, 2020)

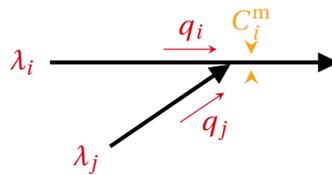
présenté par Ancelet et Hans (2020) et exposé sur la figure 2.4(b). La lecture de cette figure est la suivante :

- le fonctionnement fluide correspond à la zone 1 et est observé lorsque la demande λ ne dépasse pas le minimum des capacités des voies 1, 2 et amont. Dans ce cas, le point de fonctionnement est $(q_1 = \beta \lambda ; q_2 = (1 - \beta) \lambda)$;
- sinon, c’est le fonctionnement en congestion qui opère :
 - si la proportion β est suffisamment faible pour que la voie 2 soit congestionnée, *i.e.* $\lambda_1 := \beta \lambda < C_1$ et $\lambda_2 := (1 - \beta) \lambda > C_2$, alors le point de fonctionnement est $(q_1 = \frac{1-\beta}{\beta} C_2 ; q_2 = C_2)$. C’est le cas représenté à titre d’exemple dans la zone 2 sur la figure 2.4(b) ;
 - par symétrie, si β est suffisamment grand pour que la voie 1 soit congestionnée, alors le point de fonctionnement est $(q_1 = C_1 ; q_2 = \frac{\beta}{1-\beta} C_1)$, dans la zone 3.

2.1.2.2.2 Modélisation des convergents autoroutiers

On considère la situation de la figure 2.5, où la voie j rejoint la voie i . La restriction du nombre de voies induit une congestion si la somme des demandes dépasse la capacité C_i^m juste en aval du point de convergence. Dans les modélisations les plus simples et les plus communes, cette capacité est prise de manière exogène, considérée comme égale à la capacité théorique disponible juste en aval du convergent (Daganzo, 1995 ; Leclercq, 2009). Dans tout ce qui suit, un convergent représente une restriction de capacité active, c’est-à-dire que la congestion est causée uniquement par ce convergent et pas par une éventuelle autre restriction de capacité située en aval et dont les conditions de trafic se seraient alors propagées jusqu’à ce convergent.

Le fonctionnement des convergents a fait l’objet de modélisations macroscopiques dont

FIGURE 2.5 – Représentation du convergent sur la voie i

la plus utilisée est celle de Newell-Daganzo (Newell, 1982 ; Daganzo, 1995). Étant données les demandes λ_i et λ_j sur les voies i et j , ce modèle alloue à chaque voie un débit effectif q_i et q_j , qui peuvent être inférieurs aux demandes, en ce que la somme de ces demandes peut excéder la capacité effective du convergent. Le modèle répond donc à la question de l'allocation de ces débits qui repose sur une projection des demandes (Leclercq, 2009), ce qui est exposé figure 2.6 dans le cas simple de deux voies en amont. La voie j s'insère sur la voie i , avec un coefficient de partage de la priorité γ_j . La définition de ce coefficient a fait l'objet de nombreux débats au sein de la communauté des traficiens, certains auteurs affirmant qu'il s'agit du rapport des capacités effectives des deux voies amont (Torné *et al.*, 2014). Comme on sait que ces capacités sont proportionnelles au nombre de voies, une bonne approximation du coefficient de partage est le rapport du nombre de voies, comme cela a été prouvé expérimentalement par Bar-Gera et Ahn (2010).

L'allocation dépend donc de la demande sur chacune des voies :

- tant que la somme des demandes ne dépasse pas la capacité du convergent, chaque demande est satisfaite et la fonction de projection est nulle (*i.e.* le point de fonctionnement est $(q_i = \lambda_i ; q_j = \lambda_j)$), on est alors dans la zone 1 ;
- si la somme des demandes dépasse la capacité du convergent, alors l'une au moins des voies est congestionnée :
 - si la voie i est congestionnée et que la voie j reste fluide, alors la fonction de projection agit sur la demande de la voie i , qui ne peut être satisfaite contrairement à la demande sur la voie j (*i.e.* le point de fonctionnement est $(q_i = C^m - \lambda_j ; q_j = \lambda_j)$);
 - en échangeant i et j , on obtient, pour la zone 4, le point de fonctionnement $(q_i = \lambda_i ; q_j = C^m - \lambda_i)$, c'est l'exemple exposé sur la figure 2.6 ;
 - si les deux voies sont congestionnées (zone 3), un seul point de fonctionnement est possible, nommé par la suite point de congestion générale. Toutes les demandes y sont projetées. Ce point a pour coordonnées $(q_i = Q_{\gamma_i} ; q_j = \gamma_i Q_{\gamma_i})$.

Bien que très simple, le modèle de Newell-Daganzo est fidèle à ce qui est empiriquement observé (Troutbeck, 2002 ; Cassidy et Ahn, 2005 ; Bar-Gera et Ahn, 2010 ; Reina et Ahn, 2014), que ce soit pour l'existence du coefficient de partage de la priorité en congestion générale ou bien pour le partage de la capacité lorsqu'une seule voie est congestionnée.

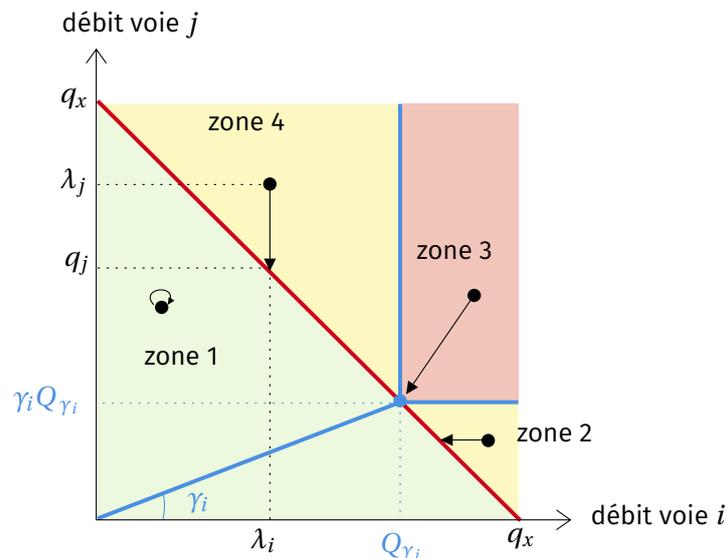


FIGURE 2.6 – Diagramme de Newell-Daganzo avec trois exemples d'allocation de la demande, pour le cas de base de deux voies convergeant vers une seule voie de capacité $C_i^m = \text{cste} (\lambda_i ; \lambda_j) = q_x$. Inspiré de (Marczak, 2014)

2.2 Identifier, reproduire, valider : l'approche empirique et la simulation

L'approche analytique permet donc de modéliser les mouvements des véhicules et les états de trafic. Deux autres approches permettent aussi de comprendre les phénomènes liés au trafic routier et peuvent en outre compléter et enrichir cette première approche.

2.2.1 Observation et utilisation de données de terrain pour l'approche empirique

L'approche empirique consiste à analyser le trafic et à identifier les phénomènes associés, que ce soit à l'échelle microscopique ou macroscopique, à partir de l'observation. C'est l'approche heuristique par excellence, puisque c'est en observant et en photographiant l'écoulement des véhicules sur le bord d'une route que Greenshields *et al.* (1934, 1935) ont proposé pour la première fois une formulation de la fonction Q . Analyser des données de terrain permet encore de nos jours de valider les formulations analytiques. Ainsi, le modèle de Leclercq *et al.* (2011, 2016a) décrivant la chute de capacité au droit des convergents autoroutiers a été validé à partir de comptages de véhicules obtenus via des boucles électromagnétiques sur une autoroute anglaise.

Pour quantifier le trafic à l'échelle microscopique, on a vu qu'on devait étudier les trajectoires des véhicules. Pour les obtenir, ce sont principalement des caméras, sur le bas-côté ou en hauteur à partir d'un hélicoptère qui sont utilisées (Knoop *et al.*, 2008 ; Li *et al.*, 2020). Les images qu'elles génèrent permettent d'obtenir les positions des véhicules et d'en déduire les autres variables microscopiques. Les progrès technologiques et la démocratisation des objets connectés permettent cependant le développement de dispositifs de mesure internes au véhicule. C'est le cas pour l'exploitation de données de véhicules traceurs, dites encore *floating car data*, obtenues directement à partir du véhicule même pour les plus récents, ou à partir des objets connectés de ses passagers (Kerner *et al.*, 2005 ; Sunderrajan *et al.*, 2016).

À l'échelle macroscopique, le principal outil de mesure est la boucle électromagnétique

(Buisson et Lesort, 2010), évoquée au début de cette partie. Ce capteur à induction est placé sous la chaussée. Lorsqu'un véhicule passe sur la boucle, le châssis métallique perturbe son champ magnétique, ce qui permet d'établir qu'elle est occupée. Le nombre de véhicules peut alors être récolté et les variables macroscopiques en être dérivées. Ajoutons que les méthodes du paragraphe précédent peuvent aussi être utilisées. En effet, on a vu que le fonctionnement global du trafic était la résultante des comportements individuels. Ainsi, en comptant à partir des données individuelles le nombre de véhicules passant en un endroit donné ou présents en une portion de section à un instant donné, on peut remonter aux variables macroscopiques (Edie, 1961).

Deux écueils sont cependant à noter. D'abord, toute mesure de données s'accompagne d'une variabilité et d'incertitudes. Ensuite, les données récoltées ne sont pas toujours disponibles en quantité ou en qualité, ce qui s'explique principalement par (Marczak, 2014 ; Gómez Patiño, 2022) :

- les limitations techniques, *e.g.* le nombre d'images par seconde d'une caméra dont on a parfois besoin qu'il soit élevé pour quantifier précisément les mouvements véhiculaires ;
- les dysfonctionnements physiques du système utilisé, *e.g.* une panne ou une défection du système à induction d'une boucle électromagnétique.

Un travail de filtrage des données est alors quasiment toujours nécessaire pour exploiter les données brutes, de sorte à éliminer les valeurs aberrantes. Il est à noter que de récentes techniques d'apprentissage automatique peuvent aider à corriger certaines valeurs mesurées, voire à estimer celles qui manquent en connaissant les données précédentes et suivantes (Jayol *et al.*, 2022).

2.2.2 Utilisation des outils de simulation numérique

2.2.2.1 Fonctionnement et positionnement de l'utilisation de ces outils

L'amélioration des performances des processeurs et de l'architecture logicielle des ordinateurs à partir de la deuxième moitié du XX^e siècle a permis l'avènement des outils de simulation numérique. Ce sont des programmes informatiques, souvent encapsulés dans un logiciel, qui reproduisent l'écoulement du trafic à partir de la discrétisation de modèles analytiques. Ces formulations décrivent un trafic routier continu, mais le passage aux outils numériques induit nécessairement leur discrétisation pour permettre leur résolution. À ce module d'écoulement est ajouté un module d'affectation, décrivant la manière dont les véhicules choisissent leur itinéraire.

On comprend donc que les simulateurs soient utilisés lorsqu'on cherche à décrire la dynamique du trafic sur des réseaux urbains ou autoroutiers présentant plusieurs sections connectées entre elles. La complexité de ces réseaux, ainsi que la combinaison simultanée des modules d'écoulement et d'affectation mais aussi le dynamisme des demandes et des offres en trafic, explique donc que l'approche analytique seule ne permette pas une résolution simple et rapide du problème. C'est ainsi que le recours à la simulation par les bureaux d'études, lorsqu'il s'agit de proposer un diagnostic de trafic ou de prévoir l'impact d'une stratégie de régulation, est très courant.

Comme on l'a vu précédemment, l'écoulement du trafic peut être décrit à l'échelle macroscopique ou bien microscopique. Ce sont deux facettes permettant de décrire la même réalité physique. Cette dualité émerge aussi pour les outils de simulation :

- la représentation macroscopique, qui décrit l'écoulement comme un flux homogène, permet un temps total de calcul moindre par rapport à la représentation microscopique. Approche utile pour un grand réseau, elle est choisie, cependant, au prix d'une

impossibilité de différencier les différentes classes de véhicules (VI, VOM, bus, poids lourds, ...) et de ne pas pouvoir obtenir les variables individuelles ;

- la représentation microscopique, qui décrit l'écoulement comme l'agrégation de l'ensemble des véhicules et de leurs interactions, permet de récolter les variables individuelles de tous les véhicules et donc de raisonner sur plusieurs classes. Cela se fait cependant au prix d'un temps total de calcul plus long et d'un nombre plus important de paramètres à caler.

L'utilisation des simulateurs de trafic se caractérise en effet, si l'on cherche à évaluer l'impact *a priori* d'une stratégie de régulation pour un réseau donné, par une étape préalable de calage puis de validation des paramètres offerts par le simulateur, ainsi qu'on y reviendra dans le chapitre 6. Le but est de s'assurer que la dynamique du trafic est correctement reproduite sur le réseau étudié, afin d'avoir une situation de référence cohérente avec la réalité.

Il faut remarquer qu'en ce qui concerne les outils de simulation microscopique, les modèles de poursuite et de changement de voie implémentés intègrent l'hétérogénéité des conducteurs et véhicules en considérant les paramètres comme des variables aléatoires (Makridis *et al.*, 2023). Il convient alors de noter qu'en combinant les erreurs numériques induites par la discrétisation, les interactions entre les modèles implémentés, et ce caractère aléatoire, la façon dont ces simulateurs traitent ces processus microscopiques est une source d'incertitudes. Les résultats simulés sont alors empreints de ces incertitudes cumulées (Punzo et Montanino, 2020).

Enfin, les simulateurs peuvent aussi être utilisés dans une approche heuristique enrichissant les connaissances sur la théorie du trafic. Ainsi Menendez et Daganzo (2007) ont-ils découvert l'effet de lissage du débit des VG évoqué dans le chapitre 1 grâce à des simulations microscopiques. Cet effet n'a ensuite été identifié et caractérisé plus en détails que plus tard, à partir de données de terrain (Cassidy *et al.*, 2010).

2.2.2.2 Description des outils de simulation microscopique utilisés dans cette thèse

On décrit dans cette partie les trois outils de simulation microscopique utilisés dans cette thèse, avec leurs modèles de poursuite et de CVO implémentés par défaut. Au vu de leur complexité et de qui seront effectivement présentés dans la thèse, leurs modèles par défaut de CVD ne sont pas présentés. Ces outils présentent trois paramètres microscopiques communs : la vitesse désirée \tilde{u} , la distance intervéhiculaire minimale g et le temps intervéhiculaire relatif² minimal τ . Il est à noter que pour Aimsun et SUMO, les modèles décomposent g en deux termes, la longueur du véhicule l et l'espacement minimal g' entre l'avant de ce véhicule et l'arrière de son *leader*, de sorte que $g = l + g'$.

2.2.2.2.1 SymuVia

SymuVia est un outil de simulation développé par le Laboratoire d'Ingénierie Circulation et Transports – Éco-gestion des Systèmes Énergétiques pour les Transports depuis 2005 et disponible en code source ouvert depuis 2021³.

Le modèle de poursuite implémenté est adapté de celui de Newell (2002). Laval et Lelercq (2008) l'ont amélioré en prenant en compte l'accélération bornée des véhicules, mettant donc de côté l'hypothèse d'accélération infinie du modèle original. Cette accélération est fixée pour tous les véhicules. La relaxation du trafic a aussi été introduite à partir du paramètre ε . Ce paramètre correspond à la différence de vitesse d'un véhicule situé en

2. le terme « relatif » fait référence aux valeurs de pare-choc à pare-choc

3. <https://github.com/licit-lab/symuvia/>

amont d'un autre venant de s'insérer, ce dernier acceptant un créneau d'insertion plus petit que celui à l'équilibre correspondant au créneau qu'il devrait normalement accepter. Cette différence de vitesse s'applique jusqu'à ce que la distance entre les deux véhicules corresponde à la longueur du créneau à l'équilibre. La position du véhicule i au temps $t + \Delta t$ vaut alors :

$$x_i(t + \Delta t) = \min \left(x_i^{\text{FF}}(t + \Delta t) ; x_i^{\text{CC}}(t + \Delta t) \right) \quad (2.4)$$

avec la composante correspondant à des conditions fluides :

$$x_i^{\text{FF}}(t + \Delta t) = x_i(t) + \min(\tilde{u}_i ; v_i(t) + a\Delta t) \Delta t$$

et la composante correspondant à des conditions congestionnées :

$$x_i^{\text{CC}}(t + \Delta t) = x_{i-1}(t) + v_{i-1}(t + \Delta t)\Delta t - \frac{\Delta N_i(t + \Delta t)}{K(v_{i-1}(t + \Delta t))}$$

où $\Delta N_i(t + \Delta t)$ est la différence de véhicules cumulés entre les véhicules $i - 1$ et i au temps $t + \Delta t$: $\Delta N_i(t + \Delta t) = \min(1 ; \Upsilon \times \Delta N_i(t))$, avec :

$$\Upsilon = K(v_{i-1}(t + \Delta t)) \left(\frac{1}{K(v_{i-1}(t))} + (v_{i-1}(t + \Delta t) - v_{i-1}(t) + \varepsilon)\Delta t \right)$$

$K(v)$ est la densité, en congestion, associée à la vitesse v : en supposant que le diagramme fondamental est triangulaire, on a, pour le véhicule i , $K(v_i(t)) := \frac{1}{g_i + v_i(t)\tau_i}$.

Le modèle de CVO est adapté de celui de [Laval et Daganzo \(2006\)](#) et décrit par [Laval et Leclercq \(2008\)](#). Il s'agit d'une extension du modèle LWR, dans la mesure où chaque voie obéit à une équation de conservation comprenant un terme de flux de création/désertion lié aux véhicules qui changent de voie. Les manœuvres de CVO sont implémentées de manière probabiliste dans le modèle avec, dans le terme du débit de création/désertion, une fraction de véhicules devant changer de voie, par unité de temps, égale à l'inverse de la valeur du pas de temps de la simulation. Le CVO est alors effectué suivant la capacité de la voie cible. En s'appuyant sur la théorie des restrictions de capacité mobiles ([Newell, 1998](#)), et en relation avec le modèle de poursuite de Newell décrit ci-dessus, ce modèle de CVO évite également l'effet de surréaction. Dans une version antérieure du modèle, cet effet traduisait le fait que l'insertion d'un véhicule entraîne l'arrêt instantané du véhicule qui le suit sur la voie cible, en raison d'une distance intervéhiculaire plus petite que le créneau d'équilibre accepté par le véhicule qui s'est inséré.

2.2.2.2 Aimsun

Advanced Interactive Microscopic Simulation tool for Urban and Non-Urban Networks est un outil de simulation espagnol développé depuis 1986, qui fait maintenant partie de Yunex Traffic, propriété d'Atlantia ⁴.

Le modèle de poursuite implémenté est décrit par [Barceló et Casas \(2005\)](#). C'est une adaptation de celui de [Gipps \(1981\)](#), qui est un modèle à distance de sécurité. Cette distance de sécurité est calculée à partir des lois de la balistique, en supposant que les véhicules ont une décélération constante. Elle correspond à la distance parcourue par un véhicule si son *leader* venait à subitement s'arrêter. Ce calcul aboutit à celui d'une vitesse de sécurité permettant de construire la composante en conditions congestionnées du modèle. La vitesse du véhicule i au temps $t + \Delta t$ vaut alors :

$$v_i(t + \Delta t) = \min \left(v_i^{\text{FF}}(t + \Delta t) ; v_i^{\text{CC}}(t + \Delta t) \right) \quad (2.5)$$

4. <https://www.aimsun.com/>

avec la composante correspondant à des conditions fluides :

$$v_i^{\text{FF}}(t + \Delta t) = \frac{5}{2} a_i \Delta t \left(1 - \frac{v_i(t)}{\tilde{u}_i} \right) \sqrt{\frac{1}{40} + \frac{v_i(t)}{\tilde{u}_i}}$$

avec la composante correspondant à des conditions congestionnées :

$$v_i^{\text{CC}}(t + \Delta t) = \sqrt{(b_i \Delta t)^2 + b_i \left[2(x_{i-1}(t) - l_i - x_i(t)) - v_i(t) \Delta t + \frac{v_{i-1}(t)^2}{b'_{i-1}} \right]} - b_i \Delta t$$

où :

- b_i est la décélération maximale, en valeur absolue, du véhicule i ;
- b'_{i-1} est la décélération maximale estimée du *leader*, en valeur absolue.

La position du véhicule i est ensuite calculée comme étant $x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t + \Delta t) \Delta t$.

Le modèle de CVO implémenté est une amélioration de celui de [Gipps \(1986\)](#), décrit par [Barceló et Casas \(2005\)](#). C'est un modèle dérivé de la théorie d'acceptation de créneaux. Il considère que les CVO s'effectuent dans une zone délimitée et n'y sont effectués que si le freinage du véhicule en amont sur la voie cible, provoqué en réaction à l'insertion du véhicule en aval, garantit la sécurité routière. Selon la logique du modèle de Gipps, cette garantie est vérifiée si la distance de freinage calculée, plus une marge de sécurité propre au véhicule qui s'insère, permettent d'éviter une collision entre les deux véhicules. La principale différence avec le modèle original de Gipps est que, dans la zone délimitée, les conducteurs devant changer de voie et qui ont déjà attendu plus d'un certain temps, qui est relatif à chaque conducteur, peuvent s'impatienter et donc réduire leur marge de sécurité. Le modèle a également été adapté pour y inclure le comportement de courtoisie. Ainsi, dans le cas des convergents, une proportion fixe de véhicules sur la voie cible adaptent leur conduite pour offrir un créneau suffisamment grand à un véhicule voulant s'insérer.

2.2.2.2.3 SUMO

Simulation of Urban MObility est un outil de simulation en code source ouvert développé depuis 2001 par le Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique⁵. De nombreux modèles de poursuite y sont implémentés. Celui par défaut, qui est aussi le plus utilisé lorsqu'on recourt à cet outil, est adapté du modèle de [Krauß \(1998\)](#). C'est un modèle à distance de sécurité, la différence principale avec le modèle de Gipps étant que l'imperfection de la conduite est intégrée de manière exogène, ce qui se retrouve dans le fait que la vitesse calculée peut être moindre que celle attendue. D'après le code source de l'outil de simulation, la vitesse du véhicule i au temps $t + \Delta t$ vaut, selon la version de 2021 utilisée pour obtenir les résultats du chapitre 3 liés à ce simulateur :

$$v_i(t + \Delta t) = \tilde{v} - r \sigma \min(\tilde{v} ; a \Delta t) \quad (2.6)$$

Ici, on a $\tilde{v} := \min(v_i^{\text{FF}}(t + \Delta t) ; v_i^{\text{CC}}(t + \Delta t))$, avec la composante correspondant à des conditions fluides :

$$v_i^{\text{FF}}(t + \Delta t) = \min(\tilde{u}_i ; v_i(t) + a \Delta t)$$

et la composante correspondant à des conditions congestionnées :

$$v_i^{\text{CC}}(t + \Delta t) = v_{i-1}(t) + \frac{x_{i-1}(t) - l_i - x_i(t) - v_{i-1}(t) \tau_i}{\frac{v_{i-1}(t) + v_i(t)}{2b} + \tau_i}$$

où :

5. <https://eclipse.dev/sumo/>

- b est la décélération maximale en cas d'urgence, en valeur absolue. Tout comme pour l'accélération, ce paramètre est fixé pour tous les véhicules ;
- σ est une valeur fixe prise dans $[0 ; 1]$ visant à rendre compte de l'imperfection de la conduite, dans le sens où ce paramètre incorpore les facteurs humains évoqués dans la partie 2.1.1.1 de manière exogène. C'est aussi le sens du coefficient r , valeur aléatoire tirée uniformément dans $[0 ; 1]$. Il est à noter que si l'équation 2.6 retourne une valeur négative à cause de la valeur de r calculée, alors une valeur nulle est retournée pour v_i .

La position du véhicule i vaut alors $x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t + \Delta t)\Delta t$.

Le modèle de CVO est décrit par Erdmann (2014). Tout comme dans le modèle de CVO de Gipps, le CVO n'est effectué par un véhicule que si le créneau d'insertion choisi par ce véhicule est suffisamment grand pour que la vitesse résultante du véhicule en amont sur la voie cible permette d'éviter une collision entre les deux véhicules. Ce CVO est déclenché en fonction de l'urgence de la manœuvre, qui est basée sur la densité de la voie cible, la distance avant le point de non retour pour effectuer cette manœuvre et suivre l'itinéraire prévu, et la vitesse du véhicule à l'approche de ce point. Supposons qu'à un instant donné, le CVO ne puisse pas être effectué. Le modèle vérifie alors si la vitesse du véhicule voulant s'insérer doit être ajustée parce qu'il est bloqué par son *leader* sur la voie initiale. Ensuite, le modèle vérifie si la vitesse du véhicule en amont sur la voie cible doit être ajustée pour offrir un créneau suffisant au véhicule voulant s'insérer.

Deuxième partie

**Étude des phénomènes aux interfaces des
VR2+**

Chapitre 3

Reproduction du fonctionnement des divergents et convergents par les outils de simulation microscopique

Ce chapitre introduit la notion centrale de cette partie II, celle des interfaces des VR2+, mais aussi les conditions de trafic qu'elles induisent, pas encore étudiées dans la littérature. L'idée est alors de modéliser analytiquement l'entrecroisement des véhicules au droit de ces interfaces à partir de la modélisation des divergents et des convergents autoroutiers. Cependant, les données de trafic au droit des interfaces sont difficiles à obtenir et l'utilisation des outils de simulation microscopique s'impose alors pour valider le modèle qui sera développé. On propose alors, avant d'aborder la modélisation analytique des interfaces dans le chapitre suivant, de s'intéresser à la bonne reproduction, par les outils de simulation microscopique, des briques de base que représentent les divergents et convergents autoroutiers. Cette démarche aboutit au développement d'une méthodologie générique de *benchmarking* de ces outils quant à cette reproduction. Une telle méthodologie est d'autant plus utile que plus en plus d'outils sont disponibles sur le marché de nos jours (van Beinum *et al.*, 2020). Sa visée est donc de répondre à la question du choix d'un outil parmi d'autres, qui se pose alors davantage de nos jours pour les bureaux d'étude.

Ainsi, la partie 3.1 expose l'intérêt de l'étude des conditions de trafic aux interfaces puis justifie la démarche entreprise pour comparer le fonctionnement des outils de simulation quant aux divergents et convergents. Cette méthodologie de comparaison est présentée dans la partie 3.2, et ses résultats, pour les outils choisis, le sont dans la partie 3.3.

3.1 Intérêt de l'étude des conditions de trafic aux interfaces d'une VR2+

3.1.1 Présentation des interfaces des VR2+

Les *interfaces* sont les zones séparant une section où la VR2+ est activée d'une section où elle n'est pas activée. Les sections où une VR2+ est activée se définissent par un flux voie par voie censé, s'il n'y a pas de fraude, être homogène, avec les VOM circulant sur la VR2+ et les véhicules individuels (VI) sur les VG. À l'inverse, les sections où elle n'est pas activée se définissent par un flux voie par voie hétérogène. Comme illustré sur la figure 3.1, on identifie trois types d'interface :

- en amont de la VR2+;
- en aval de la VR2+;

- au droit des discontinuités autoroutières, éventuellement présentes le long de la section, que sont les bretelles d'entrée ou de sortie.

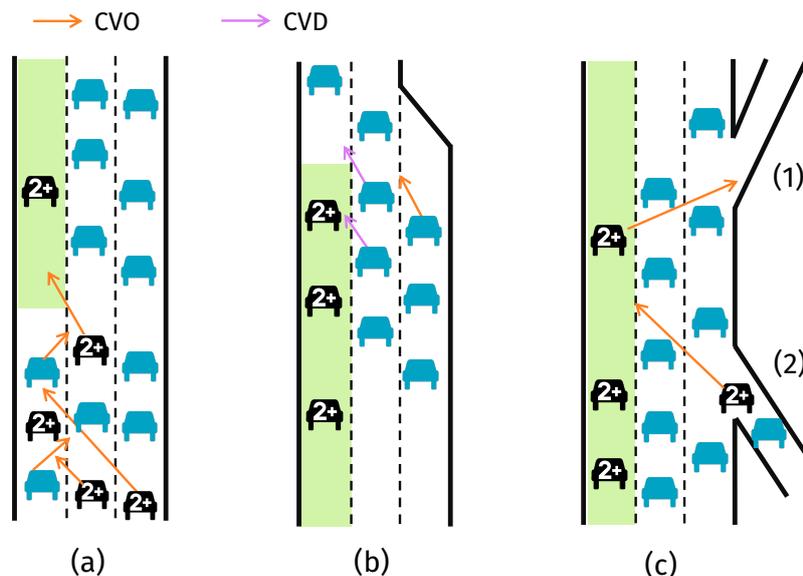


FIGURE 3.1 – Les trois types d'interface d'une VR2+ et les changements de voie qui y sont effectués : (a) l'interface amont; (b) l'interface aval dans le cas d'une réduction de voie et (c) les interfaces aux discontinuités : (1) bretelle de sortie et (2) bretelle d'entrée

Comme encore illustré sur cette figure, ces zones se caractérisent par des changements de voie :

- obligatoires :
 - pour l'interface amont si les véhicules ne se situent pas sur la voie qui leur est réservée;
 - éventuellement pour l'interface aval selon la géométrie de la restriction de capacité présente en aval. On a en effet vu dans le chapitre 1 que différentes configurations sont possibles, à l'instar d'une réduction du nombre de voies comme illustré sur la figure 3.1, ou encore une bretelle d'entrée très empruntée;
 - pour les interfaces aux discontinuités, dans le cas où un VOM doit entrer (resp. sortir) sur la section et rejoindre (resp. quitter) la VR2+.
- discrétionnaires pour l'interface aval. La VR2+ n'étant plus activée, il n'y a pas de raison que les VI ne changent pas de voie s'ils constatent que la vitesse pratiquée sur la voie en aval de la VR2+ est plus élevée que sur la leur, ce qui est l'incitatif principal déclenchant un CVD (Laval et Leclercq, 2008).

3.1.2 Vers une modélisation analytique de la chute de capacité au droit des interfaces

La littérature renseigne très bien les effets des changements de voie sur le trafic lorsque le débit est soutenu (Cassidy et Rudjanakanoknad, 2005 ; Patire et Cassidy, 2011 ; Oh et Yeo, 2012 ; Sala et Soriguera, 2018). Qu'elle soit obligatoire ou discrétionnaire, cette manœuvre n'est réalisée que si elle se fait en toute sécurité, c'est-à-dire que le conducteur estime avoir assez de temps et d'espace pour s'insérer sur la voie cible (Marczak, 2014). En conséquence, le véhicule ralentit pour pouvoir s'insérer en toute sécurité, puis accélère une fois le changement de voie réalisé, générant des vides non comblés dans le flux de trafic (Laval et Daganzo, 2006 ; Leclercq et al., 2011).

Ces comportements expliquent en grande partie les chutes de capacité observées au droit de certaines têtes de bouchon (Sala et Soriguera, 2018), c'est-à-dire que la capacité mesurée y est inférieure, de manière récurrente, à la capacité théorique. Ainsi, pour les discontinuités autoroutières que représentent les convergents et les divergents, une chute de capacité comprise entre 5 et 30 % suivant le terrain a pu être mesurée (Oh et Yeo, 2012 ; Chen et Ahn, 2018). En conséquence, il est essentiel d'analyser convenablement le fonctionnement du trafic à proximité des restrictions de capacité et de savoir caractériser les chutes de capacité qui peuvent y apparaître. En effet, si elles sont trop élevées, caractériser le trafic en négligeant ces chutes peut devenir une hypothèse déraisonnable lorsqu'on cherche à évaluer un système de transports routiers. Des indicateurs de performance comme les temps de parcours ou les longueurs de remontée de congestion peuvent alors être sous-estimés.

Ainsi, les interfaces des VR2+, par les changements de voie qu'elles provoquent, peuvent *a priori* subir ces chutes de capacité. Cependant, les modélisations, les études ou les guides pour exploitants n'en tiennent pas compte ou les négligent (Menendez et Daganzo, 2007 ; Daganzo et Cassidy, 2008 ; Hans et Damas, 2019 ; Rousic *et al.*, 2020) :

- pour l'interface amont, à notre connaissance, aucune étude sur les conditions de trafic n'a été menée, et *a fortiori* aucune sur l'impact des CVO à cet endroit ;
- pour l'interface aval, on sait que l'effet de lissage peut aboutir à une augmentation du débit des VG jusqu'à 20 % (Menendez et Daganzo, 2007 ; Cassidy *et al.*, 2010). Ce gain dépend cependant de la géométrie et de la configuration routière de la restriction de capacité aval (Lapardhaja *et al.*, 2021) ;
- pour les interfaces liées aux discontinuités, des conditions suffisantes sur les demandes aux bretelles d'entrée et pour les bretelles de sortie afin de ne pas saturer la VR2+ sont données, mais elles n'intègrent pas l'effet des mouvements de cisaillement que représentent les CVO dans ces zones.

Pour modéliser ces phénomènes aux interfaces, on peut d'abord remarquer, comme on l'avait illustré par la figure 3.1, qu'ils décrivent un entrecroisement des flux de VI et de VOM. Cet entrecroisement est similaire à celui observé sur une autoroute lorsqu'une bretelle d'entrée et une bretelle de sortie sont très rapprochées, ce que l'on nomme une *zone d'entrecroisement*, comme illustré sur la figure 3.2. Pour poursuivre leur itinéraire, les véhicules doivent effectuer un CVO. Ainsi, certains véhicules provenant de la bretelle d'entrée s'insèrent sur la voie principale, comme représenté par les flèches vertes sur cette figure, tandis que certains véhicules de la voie principale empruntent la bretelle de sortie, comme représenté par les flèches orange. Chaque voie va donc perdre des véhicules, qui vont s'insérer sur l'autre voie. On peut alors traiter chaque voie comme étant un **divergent**, les véhicules désertant alors la voie, et comme étant un **convergent**, les véhicules s'y insérant étant ceux désertant l'autre voie. C'est l'approche choisie par Marczak *et al.* (2015) pour modéliser analytiquement le fonctionnement des zones d'entrecroisement et donc y décrire les chutes de capacité.

3.1.3 Vers l'utilisation des outils de simulation microscopique pour quantifier les phénomènes aux interfaces

3.1.3.1 De l'importance de reproduire les conditions de trafic aux interfaces

Avant de développer un modèle analytique qui s'appuie sur celui des zones d'entrecroisement comme on le fera dans le chapitre 4, il faut savoir comment valider ce modèle, ce qui permettra de déterminer sa cohérence et sa pertinence. Pour ce faire, aucun jeu de données de trafic au droit des interfaces n'est disponible à notre connaissance. Le seul recours est donc celui aux outils de simulation. Les outils considérés doivent être de simulation

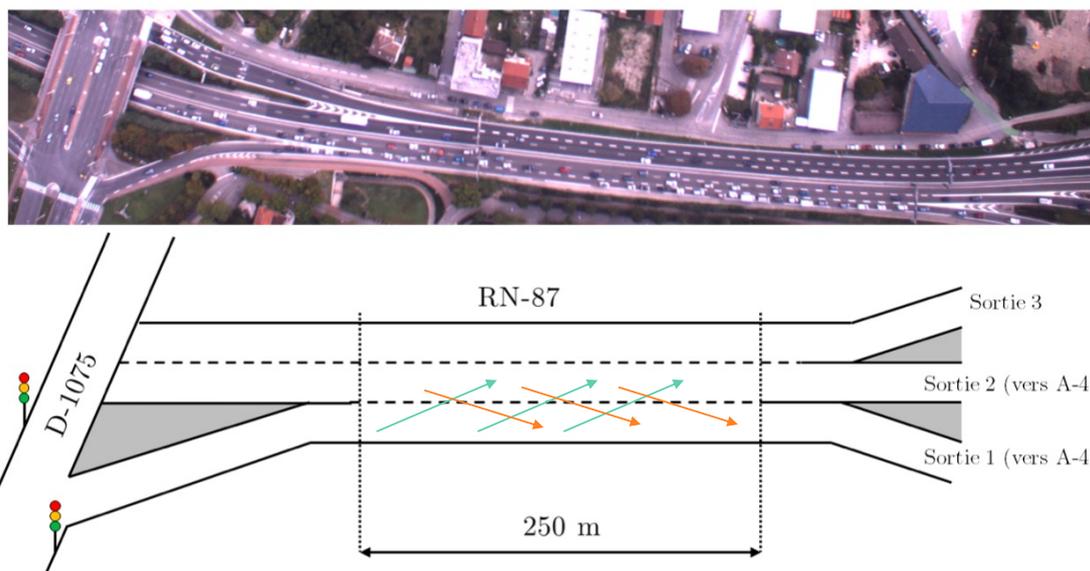


FIGURE 3.2 – Schématisation d’une zone d’entrecroisement sur une autoroute urbaine et représentation des mouvements d’entrecroisement : en vert, les véhicules passant de la bretelle d’entrée à la section courante ; en orange, les véhicules passant de la section courante à la bretelle de sortie. Repris et adapté de (Marczak, 2014)

microscopique, puisque la démarche consiste à quantifier l’agrégation des impacts des comportements individuels sur l’écoulement. Par ailleurs, ces outils sont une solution utilisée par les bureaux d’étude et dans la recherche pour évaluer l’impact du déploiement des VR2+. Cela s’explique du fait de leur intégration dans des réseaux souvent complexes, pour lesquels une modélisation analytique serait alors fastidieuse (Menendez, 2006 ; Siuhi et Mussa, 2007 ; Boriboonsomsin et Barth, 2008 ; Kan *et al.*, 2019). La bonne reproduction, par ces outils, des conditions de trafic au droit des interfaces est donc essentielle.

Au préalable, puisque la modélisation des zones d’entrecroisement utilise celle des divergents et des convergents, il est pertinent de vérifier si ces outils reproduisent correctement le fonctionnement de ces discontinuités autoroutières, notamment celui des chutes de capacité associées. L’intérêt de cette vérification va d’ailleurs au-delà du seul cas des VR2+. En effet, ces deux types de discontinuités maillent les réseaux autoroutiers du fait de la nécessaire présence de bretelles d’entrée et de sortie pour connecter à ces réseaux les territoires qu’ils traversent. On se concentrera donc, pour toute la suite de ce chapitre, sur l’étude des divergents et convergents.

3.1.3.2 Vers une démarche de comparaison croisée des outils

De nombreux outils de simulation microscopique du trafic sont disponibles de nos jours (Ratrou *et al.*, 2009 ; van Beinum *et al.*, 2020). Il est donc difficile d’en choisir un qui convienne le mieux à un critère de trafic donné, par exemple la bonne reproduction de la propagation de la congestion ou bien celle des temps de parcours (Brockfeld *et al.*, 2004 ; Toshniwal *et al.*, 2017). Une approche de référence, dite de *benchmark*, visant à comparer les résultats de ces outils pour un même cas test de trafic, semble alors nécessaire pour évaluer leur bon fonctionnement concernant ce critère donné (Brockfeld *et al.*, 2003, 2004). En utilisant, comme étalon, des données empiriques, une telle approche critique permettrait de s’assurer de la qualité de l’outil de simulation choisi quant à sa capacité à reproduire les conditions observées sur le terrain (Barceló, 2014 ; Dowling *et al.*, 2019 ; Mohammadian *et al.*, 2021 ; Punzo *et al.*, 2021). Les auteurs appelant de leurs vœux une telle démarche

de *benchmark* ont d'abord proposé une approche qui compare les modèles de poursuite sur la base d'une mesure de performance. Cette performance est liée à des variables et des indicateurs s'attachant à l'échelle microscopique, c'est-à-dire au véhicule. Des données de comptage de véhicules ont été collectées sur des réseaux simples à une seule voie et utilisées comme référence pour réaliser la comparaison. La mesure choisie est l'erreur moyenne, par rapport aux observations, des valeurs individuelles du temps de parcours (Brockfeld *et al.*, 2003), du temps intervéhiculaire (Brockfeld *et al.*, 2004), ou de la distance intervéhiculaire, de la vitesse et de l'accélération (Ranjitkar *et al.*, 2005). Dans le même temps, l'ensemble des paramètres des différents modèles est calibré à partir des données. L'ensemble sélectionné est celui qui optimise la métrique choisie, dans le sens où l'écart entre les mesures empiriques et les mesures simulées est minimisé. Une telle méthode statistique de calibrage a été utilisée dans de nombreuses études comparatives d'outils de simulation microscopique pour des cas plus complexes et réalistes (Oketch et Carrick, 2005 ; Kondyli *et al.*, 2007 ; Kan *et al.*, 2019 ; van Beinum *et al.*, 2020), mais pas à des fins de *benchmark*.

À notre connaissance, aucune méthodologie générique d'évaluation comparative des outils de simulation microscopique n'a été développée pour évaluer le fonctionnement du trafic. Pour commencer, il est naturel de s'orienter vers les cas test les plus simples possibles, constitués d'une seule voie. La démarche la plus intuitive, qui consiste à utiliser des données de terrain comme étalon, n'est alors pas la plus efficace pour réaliser l'évaluation. En effet, il faut s'assurer que ces données décrivent, en quantité et en qualité, l'ensemble des conditions de trafic permettant d'évaluer le critère de comparaison (Hoogendoorn *et al.*, 2003 ; Hawas et Hameed, 2009). Or, ces données sont difficiles à collecter pour ces cas test aussi simples, qui sont très rares sur les réseaux autoroutiers. Ainsi, à la place des données empiriques, l'utilisation de formulations analytiques validées et s'appuyant sur le modèle LWR peut s'avérer pratique.

Par ailleurs, le fonctionnement du trafic ne peut être évalué qu'à l'échelle macroscopique. En effet, même si les outils de simulation microscopique sont utilisés pour reproduire le comportement individuel des véhicules, ils combinent plusieurs sous-modèles, comme ceux de poursuite ou de changement de voie. Ainsi, l'évaluation globale des résultats de ces outils implique de prendre en compte à la fois le fonctionnement de ces sous-modèles, liés notamment aux interactions microscopiques comme ceux de changement de voie et de poursuite, et leurs interactions (Punzo et Montanino, 2020). Ce fonctionnement global est alors vérifié à l'échelle macroscopique. À partir des trois variables macroscopiques que sont le débit, la densité et la vitesse de flot, il est possible d'évaluer l'aptitude des outils à reproduire correctement des indicateurs tels que les chutes de capacité ou, pour les convergents, la manière dont l'offre aval est partagée entre les voies amont.

L'objectif des travaux exposés dans la suite de ce chapitre est double :

- d'abord, une méthodologie d'évaluation de la validité des outils de simulation microscopique du trafic quant à la reproduction du fonctionnement global du trafic au droit des discontinuités autoroutières est proposée. Plus précisément, l'étude se concentrera sur les divergents ponctuels, c'est-à-dire une voie menant à deux voies différentes, et sur les convergents étendus, c'est-à-dire deux voies séparées menant à une section commune à deux voies, qui est réduite à une seule voie en aval. Cette méthodologie s'attache à comparer les résultats de simulation avec des formulations analytiques, qui ont été présentées dans la partie 2.1.2.2 ;
- ensuite, cette méthodologie est appliquée aux trois outils ayant été décrits dans la partie 2.2.2.2. Deux outils en code source ouvert, SymuVia et SUMO, et un outil commercial, Aimsun, ont été choisis pour constituer un ensemble représentatif du marché des outils de simulation. Dans un souci de concision, aucun autre logiciel n'a été

considéré. Les conclusions de cette application aiguilleront le choix des outils utilisés pour valider le modèle qui sera développé dans le chapitre 4.

Ces travaux ont fait l'objet de la publication d'un article dans une revue à comité de lecture (Boukhellouf *et al.*, 2023).

3.2 Préparation de la comparaison croisée des outils de simulation

On présente ici les modèles analytiques utilisés en guise d'étalon pour comparer les fonctionnements macroscopiques de divergent et de convergent des trois outils. On présente aussi la méthodologie utilisée pour obtenir les résultats simulés liés à ces fonctionnements.

3.2.1 Le besoin d'une base macroscopique commune aux différents outils

Puisque l'on cherche à comparer les résultats produits par trois outils différents, ces derniers doivent être utilisés sur une base commune pour que les résultats soient comparables. Pour y parvenir, les paramètres liés aux modèles de poursuite, uniquement, sont calibrés, les autres paramètres conservant leur valeur et leur variabilité par défaut. Il est à noter que la variabilité des paramètres liés à la poursuite n'est pas prise en compte, car les modèles analytiques utilisés en guise d'étalon n'en tiennent pas explicitement compte. En corollaire, pour le modèle de Krauß implémenté dans SUMO, le paramètre σ , incorporant de manière exogène l'imperfection de la conduite, vaudra 0 dans les simulations.

Ce calibrage des paramètres microscopiques est effectué afin de se rapprocher, pour chaque outil, des valeurs macroscopiques exposés dans le tableau 3.1. Cette démarche permet alors de s'assurer que le trafic s'écoule de manière similaire entre les trois outils. Il est à noter que dans le tableau 3.1, q_x est calculé en considérant un diagramme fondamental théorique triangulaire, de sorte que l'on ait $q_x = \frac{u|w|}{u + |w|} \kappa$.

Paramètre	Notation	Valeur
Vitesse libre	u	70 km/h
Vitesse maximale de remontée de congestion	w	-19,4 km/h
Densité maximale (une voie)	κ	150 véh/km
Capacité (une voie)	q_x	2282 véh/h

TABLEAU 3.1 – Paramètres macroscopiques attendus pour assurer un écoulement similaire entre les simulateurs

Trois paramètres communs aux trois outils sont pertinents à étudier : la vitesse désirée \tilde{u} , la distance intervéhiculaire minimale g et le temps intervéhiculaire relatif minimal τ . On rappelle que pour Aimsun et SUMO, les modèles décomposent g en deux termes, la longueur du véhicule l et l'espacement minimal g' entre l'avant de ce véhicule et l'arrière de son *leader*, de sorte que $g = l + g'$. Le tableau 3.2 présente alors les valeurs des paramètres implémentés dans les différents outils. Selon la logique adoptée d'avoir une base macroscopique commune, ils ont été calculés à partir du modèle de poursuite de Newell (2002), qui est explicitement à loi macroscopique. On a ainsi $\tilde{u} = u$, $g = 1/\kappa$ et $\tau = 1/\kappa|w|$. Les valeurs du tableau 3.2 sont alors dérivées de celles du tableau 3.1.

Pour évaluer effectivement le comportement macroscopique, le diagramme fondamental est simulé pour chaque outil de simulation, le résultat étant montré sur la figure 3.3. Dans les trois cas, les diagrammes simulés coïncident avec la formulation triangulaire proposée

Paramètre	Notation	Valeur
Vitesse désirée	\tilde{u}	70 km/h
Longueur d'un véhicule	l	5 m
Espacement minimal	g'	1,67 m
Temps intervéhiculaire relatif minimal	τ	1,23 s
Accélération maximale	a	3 m/s ²

TABLEAU 3.2 – Paramètres microscopiques modifiés dans les outils de simulation

par Newell (1993b) correspondant aux paramètres du tableau 3.1. Le calibrage n'a donc pas besoin d'être poussé davantage.

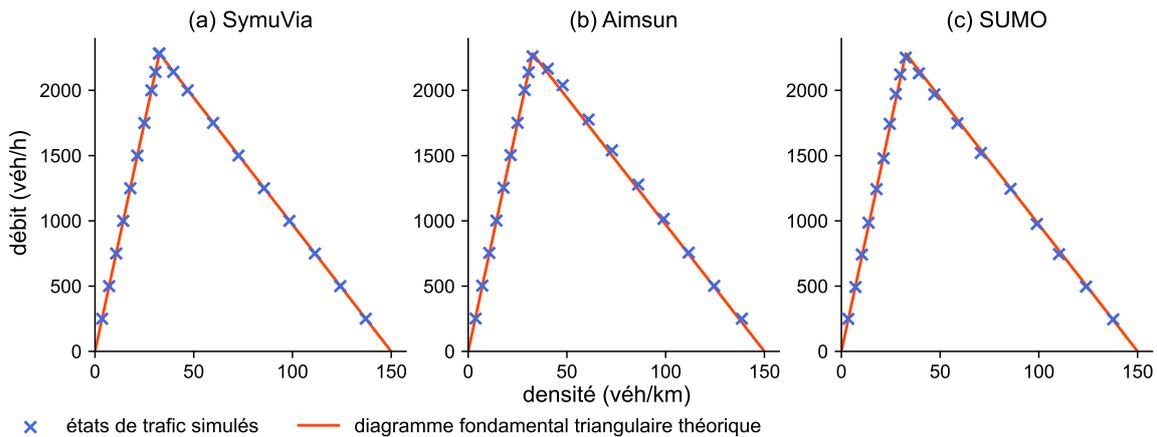


FIGURE 3.3 – Comparaison entre les diagrammes fondamentaux simulés et le diagramme fondamental triangulaire

3.2.2 Méthodologie de la comparaison croisée

On présente ici la manière dont on prépare les simulations pour récolter puis analyser les données. Les réseaux des divergent et convergent simulés sont illustrés sur la figure 3.4. Ces deux réseaux sont identiques pour les trois outils de simulation. Les capteurs fournissent, toutes les 15 secondes, les valeurs de débit, de densité et de vitesse du flot.

3.2.2.1 Génération des résultats liés au fonctionnement de divergent

Pour examiner le fonctionnement de divergent, ce qui inclut le respect de la règle de FIFO et la chute de capacité en amont du point de divergence, la propagation de la congestion est appréciée en imposant une restriction de capacité sur l'une des branches aval. Pour ce faire :

- la voie amont débite à capacité, c'est-à-dire à q_x . Puisque la capacité des deux voies aval est aussi de q_x , une restriction de capacité $C_1 \leq q_x$ est imposée sur la voie 1, choisie arbitrairement parmi les deux voies aval. Ainsi, on produit différents diagrammes de divergent en prenant cinq valeurs de C_1 allant de 0 véh/h à q_x , avec une augmentation par pas de 25 % d'une valeur à l'autre. Pour éviter un blocage complet du réseau, au lieu de 0 véh/h, on a arbitrairement choisi une valeur de 3 % de q_x ;
- pour chaque valeur de C_1 , on augmente progressivement, par pas de 25 %, la valeur de β , en allant de 0 % à 100 %;
- pour chaque valeur de C_1 et chaque valeur de β , 15 répliques d'une heure de trafic sont simulées;

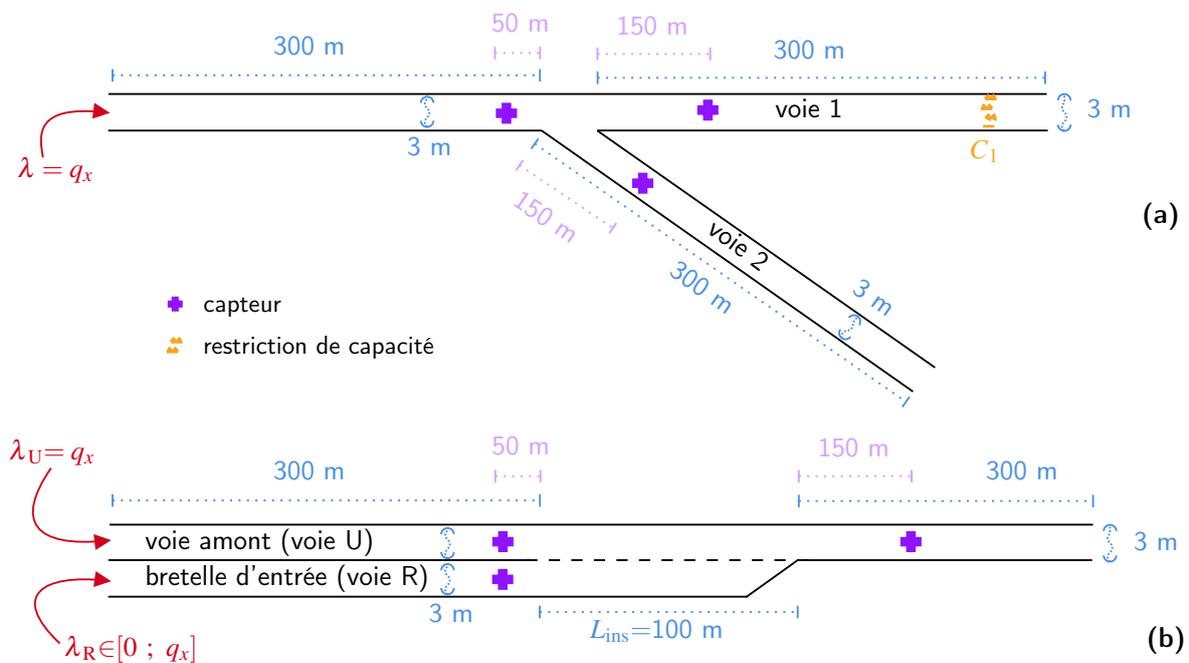


FIGURE 3.4 – Réseaux utilisés en simulation pour un divergent ponctuel avec une restriction de capacité sur l’une des voies en aval (a) et pour un convergent étendu (b)

- chaque débit effectif est la moyenne du débit pendant les 15 dernières minutes, de sorte à instrumenter une situation de trafic à l’équilibre.

Il est à noter que l’on n’a pas considéré le cas où la restriction de capacité est située sur la voie 2 en raison de la symétrie du problème.

Enfin, la formulation analytique utilisée pour la comparaison aux résultats de simulation est celle qui a été présentée dans la partie 2.1.2.2.1.

3.2.2.2 Génération des résultats liés au fonctionnement de convergent

Pour examiner le fonctionnement de convergent, ce qui inclut le partage de l’offre en aval et la baisse de capacité, la congestion est générée étape par étape sur le réseau. Le diagramme de Newell-Daganzo est un moyen synthétique de représenter de tels indicateurs. Pour le recréer, on suit la méthodologie suivante :

- la voie amont, dénommée voie U¹, débite à capacité, c’est-à-dire à q_x ,
- la valeur du débit de la bretelle d’entrée, dénommée voie R², augmente uniformément, étape par étape, du débit nul au débit de capacité, neuf étapes intermédiaires étant considérées;
- pour chaque étape, 15 répliquions d’une heure de trafic sont simulées;
- chaque débit effectif est la moyenne du débit pendant les 15 dernières minutes, de sorte à instrumenter une situation de trafic à l’équilibre.

Il est à noter que l’on n’a pas considéré le cas où la bretelle débite à capacité et où le débit de la voie amont augmente progressivement étape par étape en raison de la symétrie du problème.

Enfin, pour illustrer certains résultats, on s’intéressera à trois configurations spécifiques :

- un cas où les deux voies sont fluides, tel que $\lambda_U = \lambda_R = 500$ véh/h, dénommé FF/FF;
- un cas où la voie amont seulement est congestionnée, tel que $\lambda_U = q_x$ et $\lambda_R = 0$, $3q_x$, dénommé CC/FF;

1. pour *upstream*, « amont » en anglais

2. pour *ramp*, « bretelle » en anglais

- (c) et un cas où les deux voies sont congestionnées, tel que $\lambda_U = \lambda_R = q_x$, dénommé CC/CC.

Il est également important de noter que SUMO fournit un mode visant explicitement à reproduire l'effet des insertions effectuées en « fermeture éclair » au droit des convergents. Plus précisément, il s'agit de rendre compte du fait que les véhicules s'insèrent, en congestion générale, depuis la bretelle d'entrée à une fréquence liée au coefficient de partage de la priorité (Reina et Ahn, 2014). Ce mode sera également traité dans la comparaison croisée. En conséquence, on présentera, pour SUMO, les résultats liés au fonctionnement de convergent lorsque ce mode, dit mode *zipper*, est actif, et lorsqu'il ne l'est pas, ce qui sera par la suite dénommé comme étant le mode basique.

Enfin, la formulation analytique utilisée pour la comparaison aux résultats de simulation est celle qui a été présentée dans la partie 2.1.2.2.2.

3.3 Résultats de la comparaison croisée

3.3.1 Génération des véhicules : distribution des temps intervéhiculaires en conditions fluides

Avant d'étudier le fonctionnement macroscopique, il est pertinent de comparer la façon dont les outils génèrent les véhicules à l'entrée d'un réseau, puisque la distribution des temps intervéhiculaires peut contribuer à une chute de capacité au droit des discontinuités autoroutières (Leclercq et al., 2011 ; Marczak et Buisson, 2014).

Parmi les différentes distributions, la distribution exponentielle est celle qui correspond le mieux aux observations empiriques sur autoroute en conditions fluides (Brown, 1972 ; Cowan, 1975). Plus précisément, la génération des véhicules suit un processus de Poisson, de sorte que la distribution des temps intervéhiculaires soit exponentielle et moyenne l'inverse de la demande d'entrée. On a ensuite configuré les outils de simulation, à partir des options qu'ils intègrent, de sorte que la distribution de ces temps intervéhiculaires soit exponentielle. Il est à noter que SUMO génère explicitement des véhicules suivant un processus de Bernoulli, qui converge asymptotiquement vers un processus de Poisson, le temps entre deux occurrences d'un processus de Poisson suivant une loi exponentielle.

La figure 3.5 présente la distribution cumulée des temps intervéhiculaires simulés pour deux demandes différentes. Les mesures sont réalisées à partir de deux capteurs distants de 95 m, le premier étant situé à l'entrée du réseau. Ce réseau est constitué d'une simple voie de capacité de $q_x = 2282$ véh/h (cf. tableau 3.1), où une heure de trafic est simulée.

Pour chaque outil de simulation et pour les deux niveaux de demande, il n'y a pas de différence significative dans la distribution simulée des deux capteurs. Cela signifie que l'implémentation des modèles de poursuite n'induit pas de variabilité spatiale des temps intervéhiculaires. Aucun temps intervéhiculaire simulé n'est inférieur à $1/q_x$, qui peut donc être vu comme un temps intervéhiculaire minimal. Ceci est cohérent avec les trois modèles de poursuite mis en œuvre, qu'il s'agisse de celui de Newell ou de ceux à distance de sécurité. Ces modèles considèrent de fait que le *leader* est éloigné de son suiveur d'une distance suffisante. Par conséquent, la distribution des temps intervéhiculaires devrait être une distribution exponentielle décalée de $1/q_x$ (Cowan, 1975), ainsi que représentée en tirets verts sur la figure 3.5. Toutefois, si l'on examine, toujours sur cette figure, les distributions cumulées générées par Aimsun et SUMO, on remarque plutôt que tout se passe comme si les valeurs de temps intervéhiculaires inférieures à $1/q_x$ étaient projetées sur la valeur de $1/q_x$, comme si la distribution induite par ces deux simulateurs était tronquée.

Enfin, pour une demande plus élevée de 1500 véh/h, les temps intervéhiculaires simulés s'écartent d'une distribution exponentielle et sont davantage distribués autour du temps

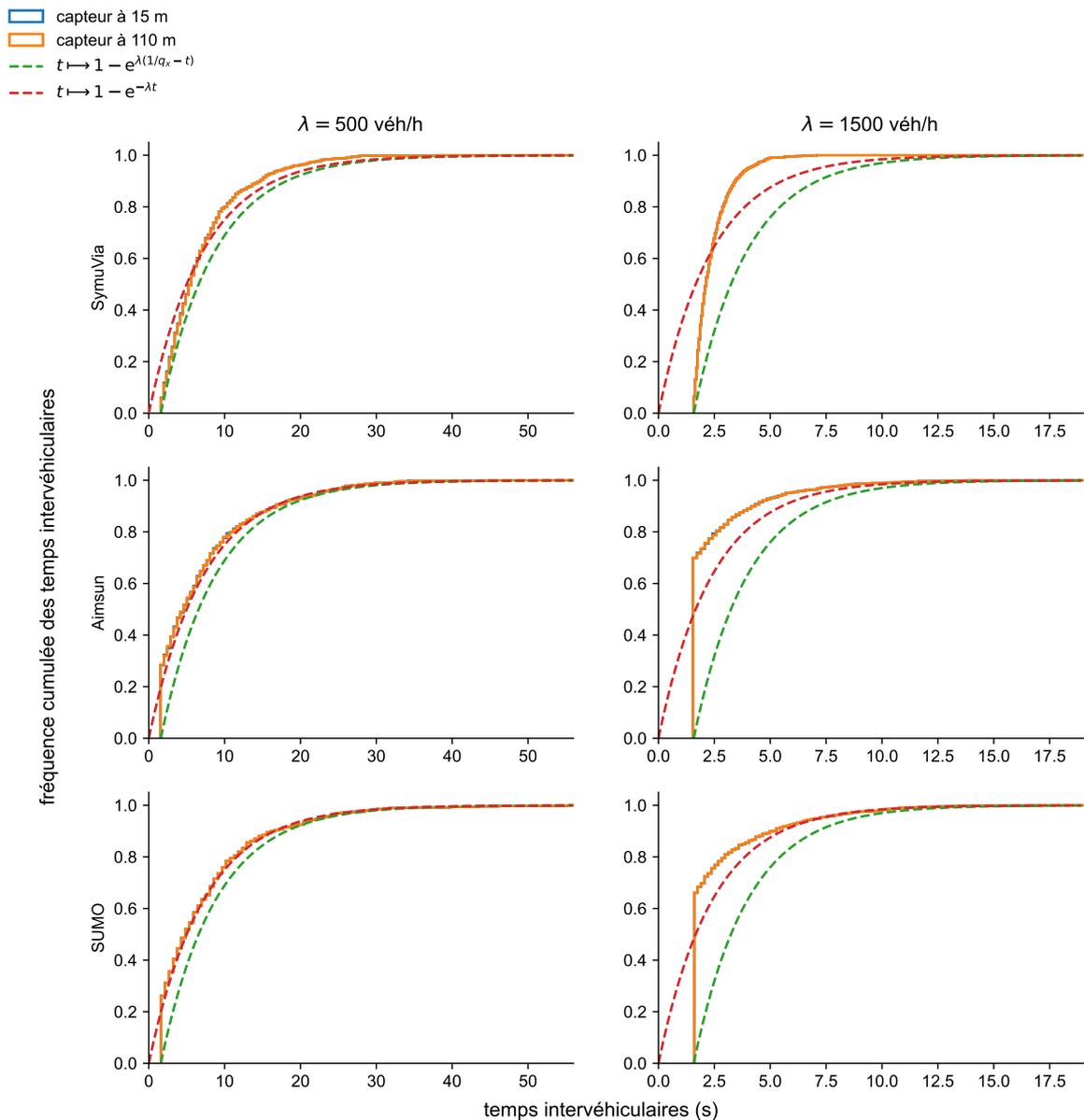


FIGURE 3.5 – Génération des véhicules : comparaison des distributions simulées des temps intervéhiculaires d’entrée avec une distribution théorique exponentielle

intervéhiculaire minimal $1/q_x$. En effet, plus il y a de véhicules dans le réseau, plus les interactions entre eux augmentent, et donc plus les grands temps intervéhiculaires sont rares (Roy et Saha, 2018).

3.3.2 Résultats liés au fonctionnement de divergent

La figure 3.6 présente les diagrammes de divergent pour chaque outil de simulation selon la méthodologie présentée dans la partie 3.2.2.1. Comme les débits simulés sont projetés sur les lignes pointillées grises de la figure 3.6, correspondant aux iso- β , la règle du FIFO est respectée même en cas de congestion sur l’une des branches aval, le fonctionnement de divergent est donc correctement reproduit. Toutefois, aucun outil ne permet d’apprécier une chute de capacité significative en amont, puisque les débits effectifs simulés correspondent à la courbe analytique théorique, quelles que soient les conditions de trafic. Cela signifie que la décélération attribuée à l’anticipation des changements de voie mise en évidence par Marczak et Buisson (2014) n’est pas implémentée dans les outils de simulation pour le

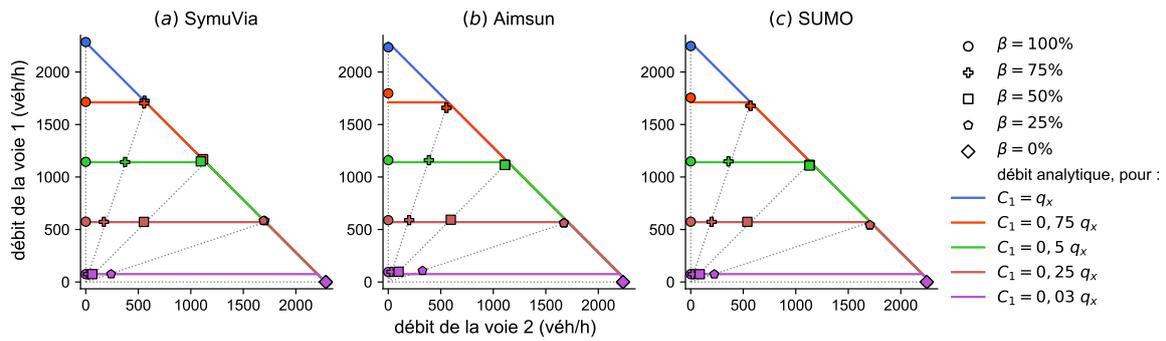


FIGURE 3.6 – Comparaison croisée des diagrammes de divergent simulés

cas simple d'un divergent ponctuel. On observe toutefois un ralentissement des véhicules qui divergent sur Aimsun, mais comme le montre la figure 3.6(b), cela n'induit pas, à une échelle agrégée, de chute de capacité.

3.3.3 Résultats liés au fonctionnement de convergent

3.3.3.1 Résultats du fonctionnement macroscopique

Pour introduire les résultats macroscopiques, les figures 3.7 et 3.8 présentent, pour chaque outil de simulation, l'évolution de la vitesse de flot et du débit pour les trois capteurs du réseau (cf. figure 3.4(b)). Elles correspondent aux cas de trafic FF/FF, CC/FF et CC/CC décrits dans la partie 3.2.2.2. Pour chaque outil et pour chaque cas de trafic, les valeurs sont celles d'une seule simulation. Les courbes sont lissées avec moyenne mobile d'agrégation de 2 minutes. Il convient de noter que la même graine aléatoire a été utilisée pour les deux modes de SUMO afin de les comparer sur la même réplcation. Les débits attendus sont les débits théoriques calculés à partir du modèle de [Leclercq et al. \(2011\)](#). Ce modèle a été validé à partir de données empiriques. Il complète le celui de Newell-Daganzo en calculant la chute de capacité de manière endogène, par l'agrégation des interactions microscopiques liées aux insertions à proximité du convergent.

L'analyse des vitesses de la figure 3.7 montre que les outils de simulation reproduisent correctement le fonctionnement de convergent. En effet, lorsque le trafic est fluide, les vitesses simulées sont proches de la vitesse libre, alors que lorsqu'il est congestionné, elles sont inférieures à cette vitesse libre. On peut remarquer que pour le cas CC/FF, les vitesses sur la bretelle peuvent dépasser, pour SymuVia, la vitesse libre. C'est à lier au fonctionnement de cet outil lorsqu'un véhicule venant de la bretelle s'insère et doit dépasser les véhicules présents sur la voie amont.

En ce qui concerne l'analyse des débits, il convient de noter que dans les figures 3.8(a) et 3.8(b), les fluctuations des débits sont dues à la distribution exponentielle des temps intervéhiculaires. De même, lorsque seule la voie en amont est congestionnée (figure 3.8(b)), le débit en aval est plus ou moins constant, de valeur proche de q_x . Ce n'est pas le cas pour Aimsun, le débit étant inférieur à q_x en moyenne et fluctuant davantage. Enfin, dans toutes les situations de congestion générale simulées (figure 3.8(c)), les débits restent plus ou moins constants. Aucune chute de capacité n'est observée avec SUMO. Son fonctionnement en mode basique montre par ailleurs que le débit sur la bretelle est plus important que celui sur la voie amont, ce qui ne correspond pas à ce qui est observé empiriquement, la priorité devant de fait être davantage donnée à la voie amont ([Bar-Gera et Ahn, 2010](#)). Cependant, les chroniques simulées en congestion avec Aimsun sont différentes et présentent des fluctuations, bien que d'amplitude et de fréquence moindres qu'en fluide. Étant donné que la baisse de capacité peut être causée par divers comportements individuels liés à la physique

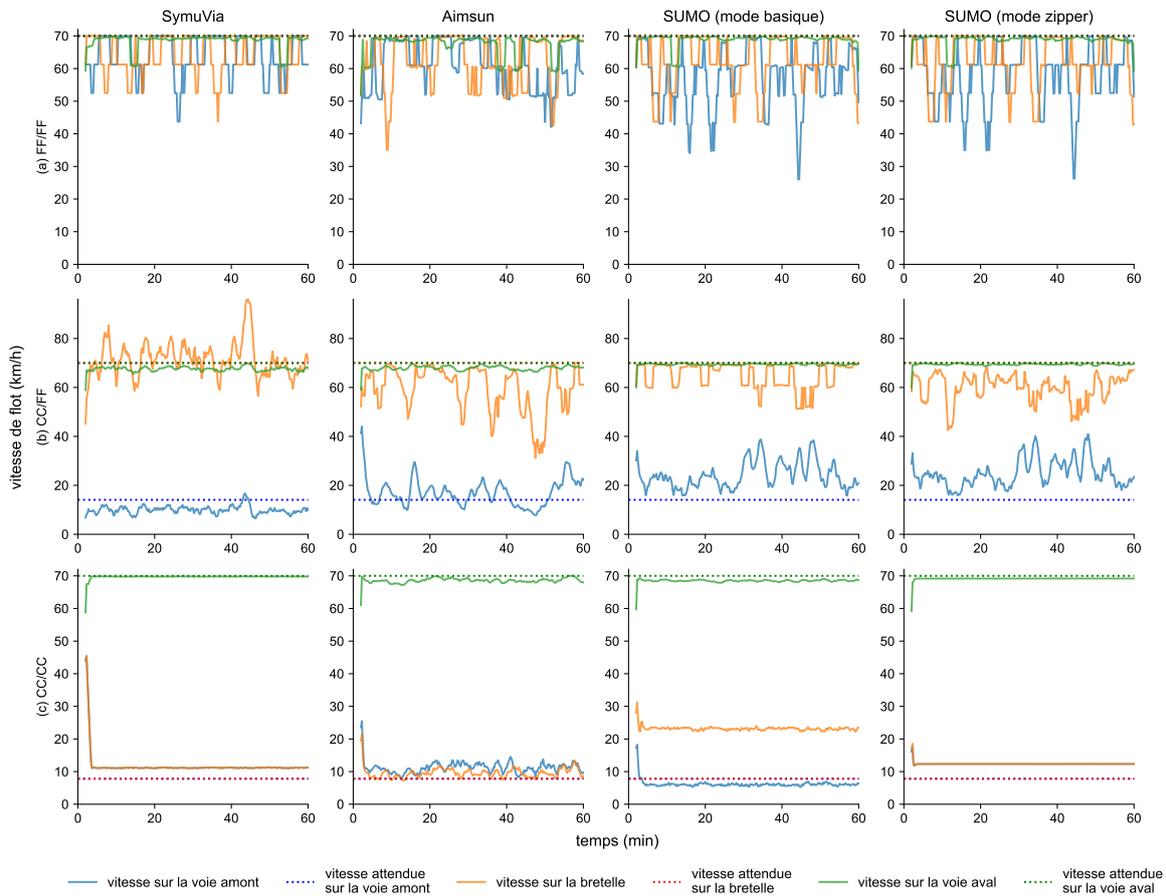


FIGURE 3.7 – Chronique des vitesses de flot pour une simulation, lorsque (a) les deux voies sont fluides; (b) la voie U est congestionnée et la voie R fluide; (c) les deux voies sont congestionnées

des insertions, et qu'Aimsun est le seul outil faisant état d'une chute de capacité significative, on peut considérer que ces fluctuations sont la marque de cette chute de capacité.

La figure 3.9 fournit, à partir des courbes de débits cumulés associés à la figure 3.8, un point de vue plus global. Il convient de noter qu'une période de « refroidissement » est observée après 60 minutes simulées, les demandes d'entrée étant alors nulles. Cela permet tout d'abord de vérifier que les outils font en effet entrer tous les véhicules qui demandent à entrer sur le réseau. Plus précisément, les véhicules qui ne peuvent pas entrer à un instant donné en raison de la congestion à l'entrée du réseau pénètrent lorsque les conditions de trafic y redeviennent fluides. Ce n'est pas le cas pour tous les simulateurs, certains supprimant purement et simplement ces véhicules (Marczak, 2014). Ensuite, dans les cas congestionnés, les débits cumulés sont limités entre une courbe où la chute de capacité n'est pas prise en compte, en traits rouges, et une courbe où elle l'est, obtenue à partir du modèle de Leclercq *et al.* (2011), en traits dorés. À la lumière de cet encadrement, le comportement macroscopique des outils de simulation semble cohérent, Aimsun montrant, comme on l'avait entrevu ci-dessus avec les chroniques de débit, une chute de capacité plus importante dans les cas congestionnés (figure 3.8(b) et (c)). Cependant, lorsque les deux voies sont congestionnées (figure 3.8(c)), le mode basique de SUMO indique un nombre de véhicules cumulés plus élevé sur la bretelle que dans le cas où il n'y a pas de chute de capacité, ce qui est incohérent.

Afin d'avoir une analyse plus détaillée et précise de ces phénomènes et de les quantifier correctement, la figure 3.10 présente les diagrammes de Newell-Daganzo associés à chaque outil de simulation, conformément à la méthodologie de la section 3.2.2.2. De

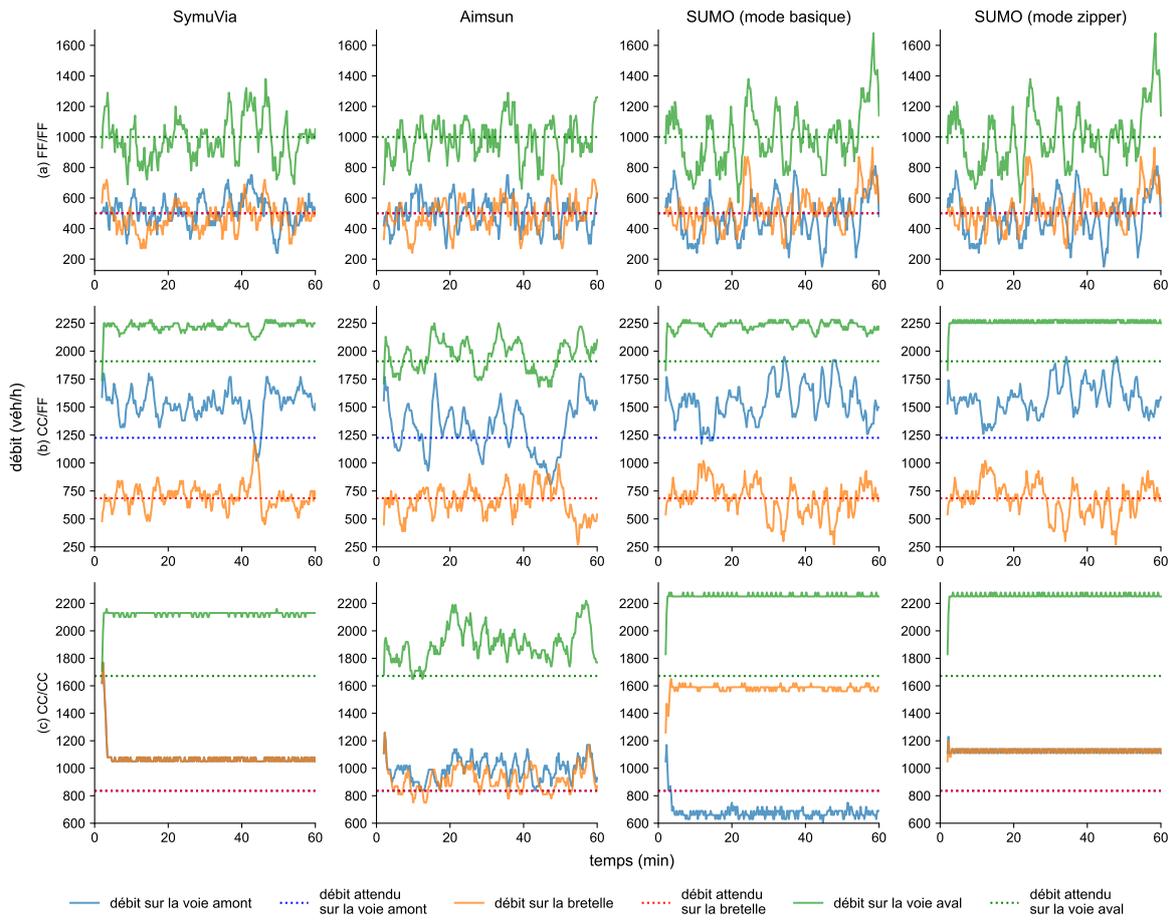


FIGURE 3.8 – Chronique des débits pour une simulation, lorsque (a) les deux voies sont fluides; (b) la voie U est congestionnée et la voie R fluide; (c) les deux voies sont congestionnées

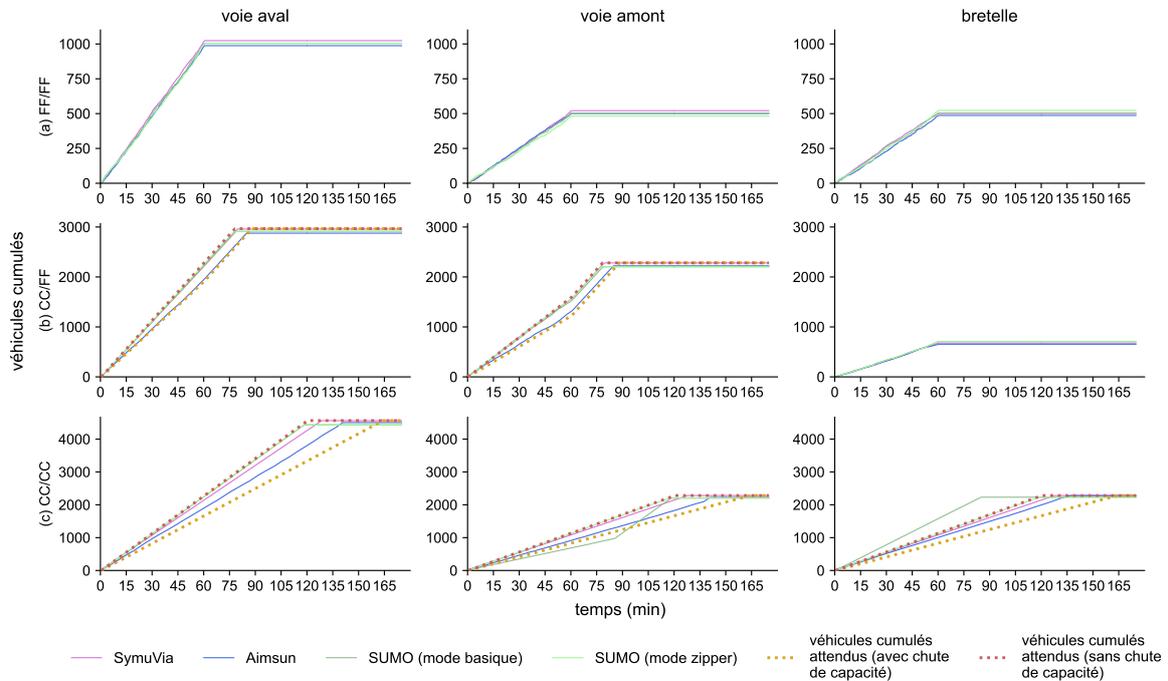


FIGURE 3.9 – Débits cumulés associés à la figure 3.8, lorsque (a) les deux voies sont fluides; (b) la voie U est congestionnée et la voie R fluide; (c) les deux voies sont congestionnées

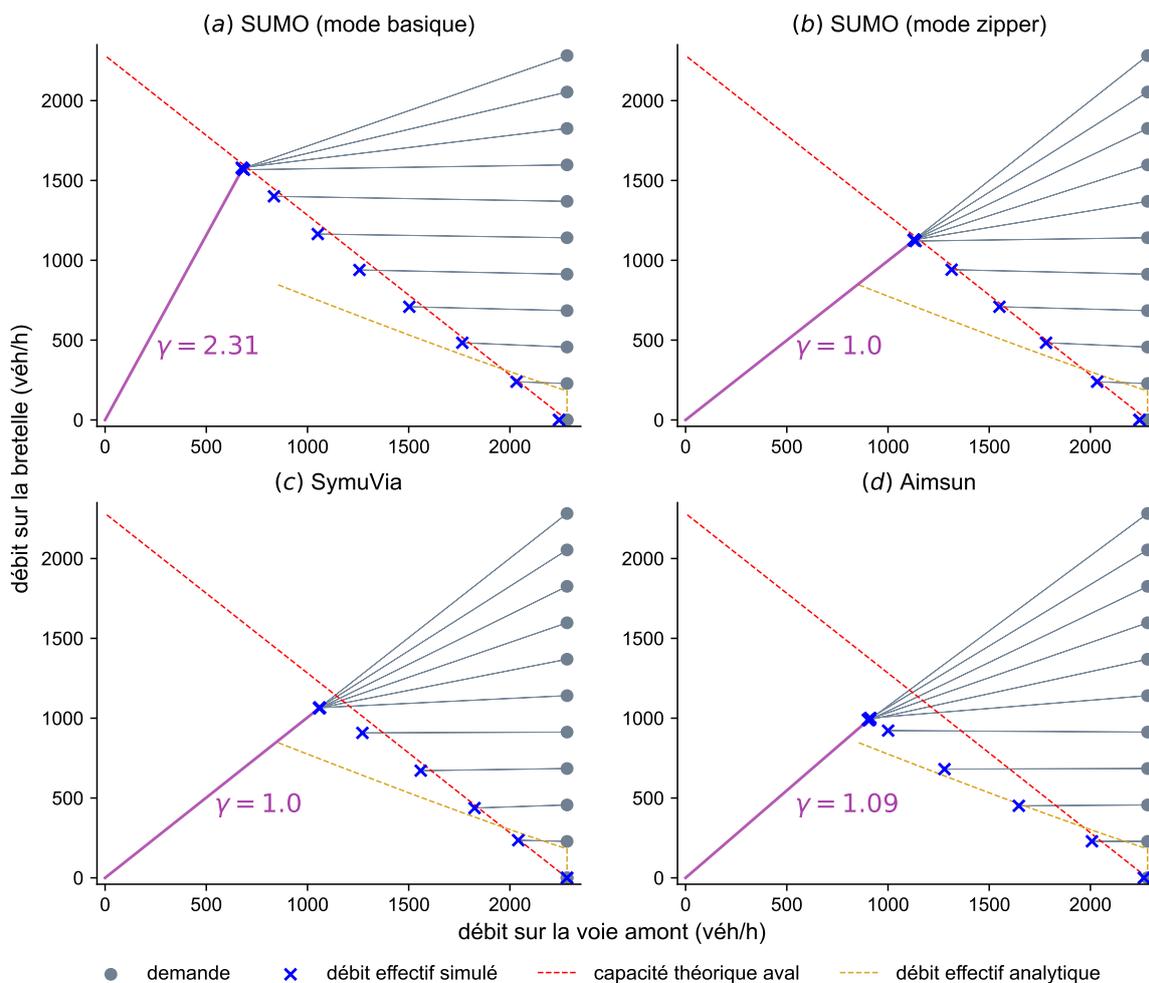


FIGURE 3.10 – Comparaison croisée du diagramme de Newell-Daganzo. Les lignes grises correspondent à la fonction de projection de Newell-Daganzo et les traits dorés au modèle de [Leclercq et al. \(2011\)](#)

Outil de simulation	Chute de capacité maximale	Chute de capacité moyenne en congestion générale	Coefficient de partage de la priorité γ
SymuVia	7,04 %	6,97 %	1,00
Aimsun	17,16 %	16,71 %	1,09
SUMO (mode basique)	3,78 %	1,24 %	2,31
SUMO (mode <i>zipper</i>)	1,72 %	1,13 %	1,00
<i>modèle analytique de Leclercq et al. (2011)</i>	25,57 %	25,57 %	1

TABLEAU 3.3 – Résultats macroscopiques principaux permettant d'apprécier le fonctionnement de convergent

ces diagrammes découle le tableau 3.3, qui indique la chute de capacité mesurée en cas de congestion générale et le coefficient de partage de la priorité. On peut remarquer que les quatre configurations de simulation (SymuVia, Aimsun, le mode basique de SUMO, et le mode *zipper* de SUMO) peuvent être regroupées en deux familles de fonctionnement. Elles respectent le fait que la demande est projetée sur la courbe de capacité du fait de la

restriction de l'offre en aval. Ainsi, le fonctionnement macroscopique des convergents est correctement reproduit dans chaque outil de simulation.

- La première famille de fonctionnement rassemble les résultats liés à SUMO, cf. figures 3.10(a) et (b). Elle se caractérise par l'absence de chute de capacité significative en situations congestionnées, la capacité théorique en aval étant partagée entre les voies U et R. Dans le cas du mode *zipper*, le partage de la capacité en aval est égal, puisque le coefficient de partage vaut 1, ce qui correspond au rapport entre le nombre de voies et est donc conforme aux observations empiriques (Bar-Gera et Ahn, 2010). Toutefois, comme le montrait déjà la figure 3.9, dans le cas du mode basique, ce coefficient est supérieur à 2, ce qui signifie que plus des deux tiers des véhicules, en congestion générale, proviennent de la bretelle. Cette valeur est trop élevée et irréaliste, puisqu'elle signifie que les véhicules venant de la bretelle sont prioritaires par rapport à ceux de la section courante, ce qui n'est pas le comportement attendu du fait de la réglementation³ ;
- la deuxième correspond aux résultats liés à SymuVia et Aimsun, cf. figures 3.10(c) et (d). Une chute de capacité est observée en situations congestionnées, bien qu'inférieure à celle prévue par le modèle analytique, notamment pour SymuVia. Enfin, le coefficient de partage de la priorité vaut 1 pour SymuVia et 1,09 pour Aimsun, ce qui correspond au rapport du nombre de voies et est donc cohérent avec les observations empiriques. La valeur légèrement supérieure à 1 pour Aimsun pourrait s'expliquer par un comportement de courtoisie simulé légèrement exagéré de la part des usagers de la section courante. La vérification demanderait une investigation en modifiant les paramètres des modèles de changement de voie.

3.3.3.2 Distribution des positions de changement de voie sur un convergent étendu

Pour terminer l'étude, on prend une vision microscopique en analysant, pour les convergents, la distribution spatiale des changements de voie des véhicules venant de la bretelle. En effet, la variabilité de ce comportement microscopique peut avoir des conséquences sur le fonctionnement macroscopique (Laval et Daganzo, 2006 ; Leclercq *et al.*, 2011 ; Marczak, 2014).

Pour présenter cette analyse, la figure 3.11 montre, pour les cas de trafic CC/FF et CC/CC, les trajectoires des véhicules dans la zone de longueur L_{ins} sur la figure 3.4(b), où s'effectuent les CVO induisant des insertions. Il est à noter que la position d'une insertion n'est comptabilisée qu'à partir du moment où l'intégralité du véhicule se situe sur la voie cible. Premièrement, on observe que les véhicules s'insèrent sur les 20 derniers mètres pour SymuVia et pour les deux modes de SUMO, alors que les insertions sont davantage distribuées pour Aimsun. Deuxièmement, la congestion se produit là où les véhicules de la voie d'accès s'insèrent. Ceci est montré par le ralentissement expérimenté par les véhicules venant de la voie amont et la propagation des ondes de choc induites par les insertions des véhicules venant de la bretelle.

Pour aller plus loin, la variabilité des positions des insertions est étudiée, cf. figure 3.12. Comme le processus d'insertion diffère selon que la congestion est soutenue ou non (Marczak, 2014 ; Li et Cheng, 2019), les trois cas de trafic FF/FF, CC/FF et CC/CC ont été considérés. Les temps de simulation ont été adaptés de sorte que, pour chaque outil et pour chaque cas de trafic, la distribution résultante présente environ 1500 insertions. Les distributions montrées sur la figure 3.12 sont donc comparables. Il convient également de noter que la forme de la distribution ne change pas suivant la taille de la zone d'insertion. C'est pourquoi

3. voir, pour le cas français, l'article R421-3 du Code de la route : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006842314

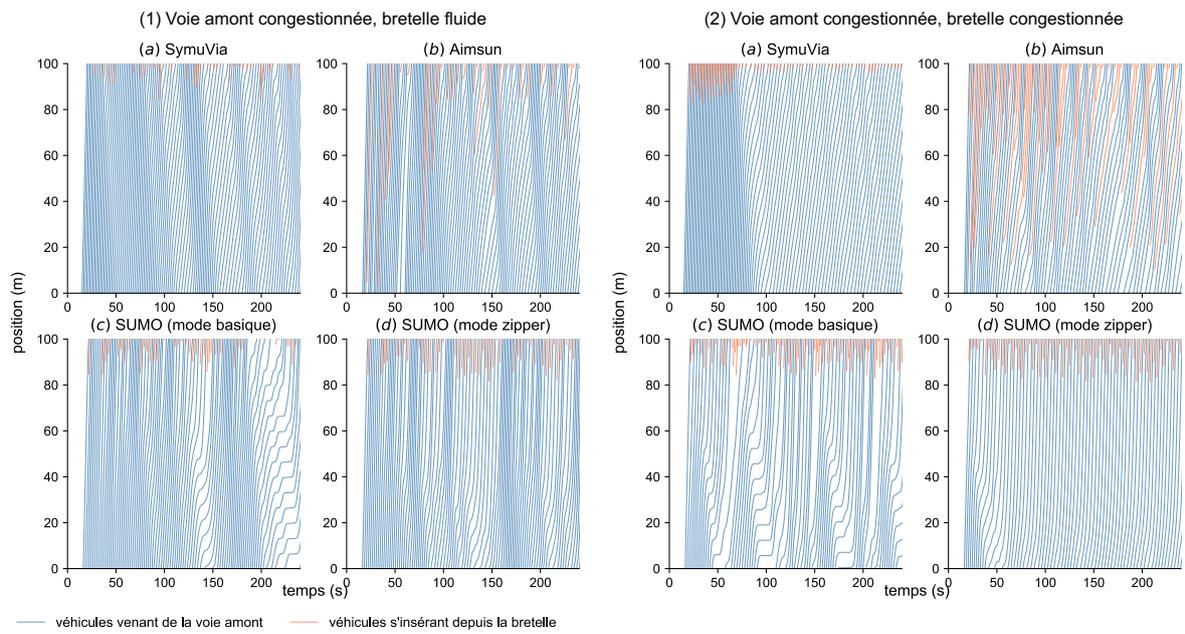


FIGURE 3.11 – Trajectoires des véhicules dans la zone du convergent étendu où s’effectuent les insertions lorsque (1) la voie amont est congestionnée et la bretelle est fluide ; et (2) les deux voies sont congestionnées

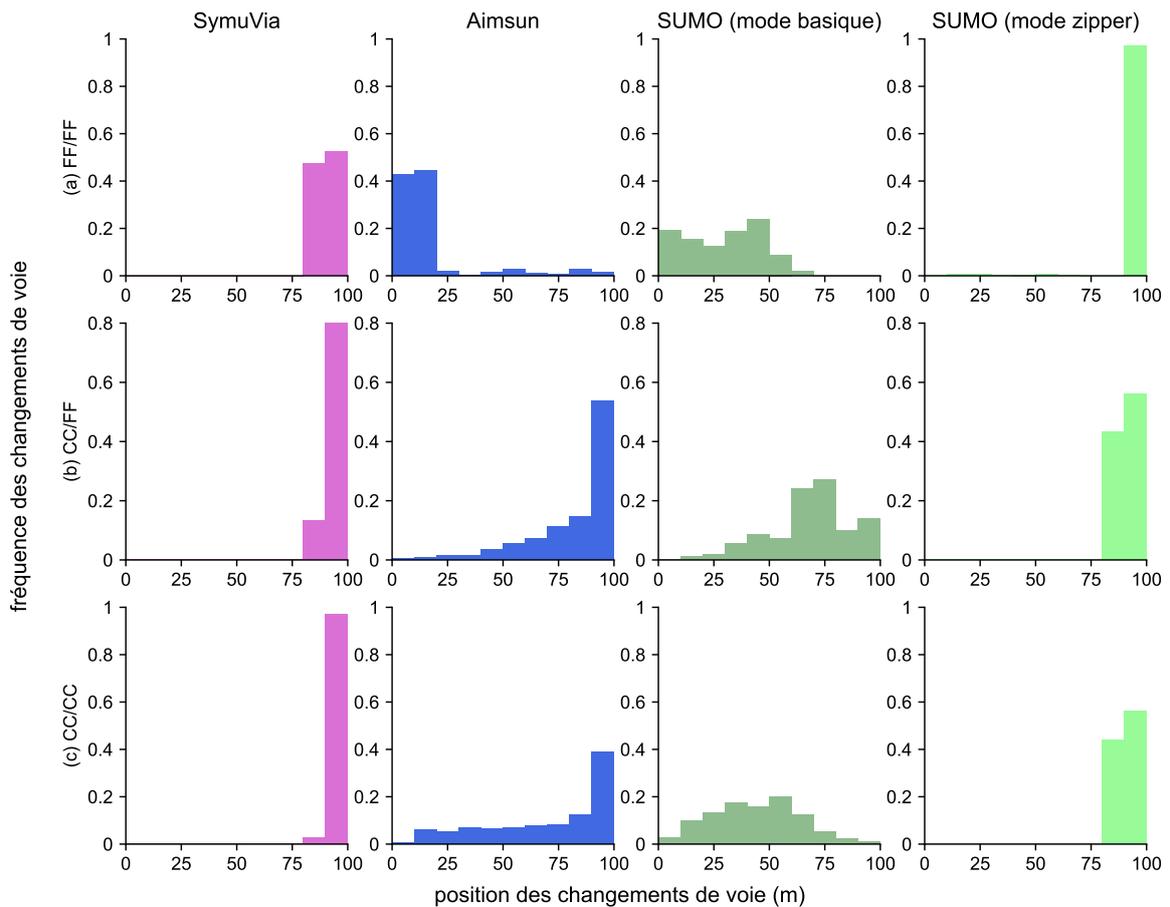


FIGURE 3.12 – Distribution des positions de changement de voie simulées en amont d’un convergent étendu, lorsque (a) les deux voies sont fluides ; (b) la voie U est congestionnée et la voie R fluide ; (c) les deux voies sont congestionnées

on ne donne et ne détaille que les résultats du cas de base utilisant une zone d'insertion d'une longueur de 100 mètres.

Chaque insertion dans SymuVia est effectuée dans les 20 derniers mètres de la zone, et s'approche de la fin de la zone d'autant plus que la congestion devient importante sur la bretelle. Les résultats d'Aimsun montrent que les insertions sont réparties sur toute la zone, même si elles sont plus proches de l'entrée dans le cas d'un trafic fluide. Toutefois, il convient de noter qu'en congestion, de nombreux véhicules changent de voie sur la fin de la zone. Cela peut s'expliquer par le fait que les conducteurs n'ont pas pu expérimenter de créneau suffisamment grand avant la fin de la zone. Dans le mode basique de SUMO, les insertions sont plus proches du début de la zone en conditions fluides et davantage réparties en conditions congestionnées. Enfin, les résultats du mode *zipper* sont à l'opposé de ceux de SymuVia, car les insertions sont concentrées à la fin de la zone lorsque le trafic devient fluide.

Cependant, les données empiriques sur les autoroutes européennes montrent que plus la bretelle est encombrée, moins les insertions sont réparties et plus elles sont proches du début de la zone d'insertion (Marczak, 2014 ; van Beinum *et al.*, 2020). Ainsi, puisque ceci n'est pas observé dans les résultats simulés, les outils de simulation choisis, avec leur fonctionnement par défaut, ne reproduisent pas de manière cohérente la composante spatiale du phénomène d'insertion au droit des convergents étendus, à l'échelle microscopique. Cependant, ces remarques devront être confirmées par une analyse comparative avec des données empiriques adaptées au présent cas d'étude simulé, ce dont on ne dispose pas.

3.4 Conclusion et discussion

L'étude exposée dans ce chapitre visait à fournir une méthode de *benchmark* générique appliquée aux outils de simulation microscopique quant à la reproduction globale des conditions de trafic. Pour ce faire, on s'est attaché au cas des convergents et des divergents. Leur fonctionnement permet de décrire celui des zones d'entrecroisement dont on s'inspirera dans le chapitre suivant pour construire la modélisation des phénomènes aux interfaces des VR2+. Plus généralement, l'étude de ces deux discontinuités autoroutières permet même de couvrir les phénomènes de trafic se produisant au droit des principales restrictions de capacité des autoroutes urbaines : une zone d'entrecroisement est un convergent en amont d'un divergent ; une réduction du nombre de voies est très similaire à un convergent.

Cette méthode générique de *benchmark* peut être synthétisée comme suit :

1. pour s'assurer que cette comparaison est faite sur une base commune aux outils, on s'assure que les diagrammes fondamentaux sont similaires, et donc que l'écoulement du trafic aussi. On calibre pour ce faire les valeurs microscopiques suivantes : la vitesse désirée, la distance intervéhiculaire relative et le temps intervéhiculaire relatif minimal. Les autres paramètres des modèles implémentés sont ceux par défaut ;
2. deux cas test sont reproduits dans les outils de simulation, un divergent ponctuel et un convergent étendu ;
3. on utilise des formulations analytiques définissant, comme un étalon, le comportement attendu pour les deux cas test, ce qui permet une comparaison aux résultats simulés.

Pour les trois outils choisis, les résultats principaux sont les suivants :

- sur le fonctionnement de divergent :
 - le fonctionnement macroscopique lié à la propagation de la congestion est correctement reproduit ;
 - aucune chute de capacité liée aux changements de voie en amont n'a été identifié ;

- en corollaire, aucun ralentissement significatif des véhicules en amont du point de divergence n'a été identifié non plus;
- sur le fonctionnement de convergent :
 - au niveau du partage de l'offre aval :
 - SymuVia, Aimsun et le mode *zipper* de SUMO présentent un partage égal, tel qu'attendu par les observations empiriques;
 - le mode basique de SUMO présente un partage irréaliste indiquant que les véhicules de la section courante;
 - au niveau de la chute de capacité :
 - la chute de capacité maximale observée sur Aimsun, d'environ 17 %, est plus élevée que celle mise en évidence sur SymuVia, environ 7 %. Ces deux résultats sont cependant cohérents avec les valeurs observées empiriquement, entre 5 et 30 % (Oh et Yeo, 2012 ; Chen et Ahn, 2018);
 - l'utilisation de SUMO, quel que soit le mode, ne permet pas d'exhiber de chute de capacité;
- pour chaque configuration, le comportement spatial d'insertion des véhicules n'est pas cohérent avec les observations expérimentales. Il convient de noter que ce résultat doit être approfondi par une analyse comparative avec les données empiriques adaptées au cas d'étude proposé dans cette étude.

Toutefois, comme nos observations portent sur un cadre très simple de simulation, ces résultats présentent des limites. Tout d'abord, on peut augmenter le nombre d'outils de simulation auxquels appliquer la démarche développée ici afin d'avoir un aperçu plus précis du comportement par défaut de la plupart des outils de simulation utilisés par les bureaux d'étude. Ici, on s'est limité à trois outils pour rester concis. Deuxièmement, les cas test de divergent et de convergent utilisés ici sont, dans la même veine, les plus simples possibles. La méthodologie gagnerait en réalisme et pertinence en étant étendue à des cas plus complexes présentant, notamment, plusieurs voies. Cela nécessite cependant, en guise d'étalon, soit des modèles analytiques adaptés, soit des données empiriques en quantité et de qualité suffisante.

Ensuite, l'hypothèse de base de ce *benchmark*, qui repose sur le fait que peu de paramètres aient été modifiés, peut en partie expliquer pourquoi aucune chute de capacité n'a été observée en amont des divergents simulés. On pourrait alors étudier l'impact des autres paramètres dans les modèles de changement de voie et dans les modèles de poursuite, tels que la décélération pour les modèles à distance de sécurité. Enfin, la stochasticité des paramètres microscopiques utilisés n'a pas été considérée, puisqu'elle n'est pas prise en compte dans les formulations analytiques choisies. Il faudrait cependant l'étudier plus en détail car elle peut avoir un impact significatif sur les valeurs des indicateurs de trafic, comme la longueur de remontée de congestion, pour des réseaux sophistiqués reproduits en simulation (Storani *et al.*, 2021).

Plus globalement, ces résultats sont une nouvelle preuve que l'utilisation des outils de simulation microscopique doit être faite avec précaution. Il faut donc, avant de les employer et au moment d'en analyser les résultats, avoir en vue que leur emploi doit être en cohérence avec le niveau de complexité du réseau étudié et la stratégie à évaluer.

Pour terminer, on utilisera les outils SymuVia et Aimsun afin de valider le modèle développé dans le chapitre 4. L'agrégation des comportements individuels simulés, au moins au niveau du fonctionnement de convergent, a montré leur capacité à reproduire une chute de capacité. Cette agrégation étant à la base du modèle qui sera développé, cela confirme la possibilité de pouvoir les utiliser pour cette validation.

Chapitre 4

Modélisation analytique de l'écoulement du trafic induit par le déploiement d'une VR2+

Le chapitre précédent a introduit les interfaces. Il a mis en évidence qu'elles étaient, jusqu'ici, peu prises en compte dans la littérature lorsqu'il s'agit de quantifier l'impact d'une VR2+ sur l'écoulement du trafic. Portes d'entrée et de sortie d'une VR2+, les interfaces sont en effet des endroits où s'entrecroisent les flux de VOM et de VI, pouvant générer des chutes de capacité. Ces dernières induisent alors une hausse des temps de parcours pour tous les véhicules, ce qui peut, pour les covoitureurs, diminuer l'intérêt à utiliser la VR2+. Au-delà de l'étude de ces interfaces, il est important d'agrandir l'échelle en décrivant analytiquement les conditions de trafic sur la globalité de la section. Dans le cas de réseaux simples, l'enjeu principal est d'éviter le recours, alors disproportionné et potentiellement laborieux, à la simulation dynamique.

Dans ce contexte, le but de ce chapitre est de proposer une modélisation analytique de l'interface amont, qui est la plus commune et générique des interfaces, comme l'expose la partie 4.1. Plus globalement, il s'agit de modéliser l'écoulement du trafic sur une section où est déployée une VR2+, ce qui sera évoqué dans la partie 4.2.

4.1 Modélisation analytique de la capacité de l'interface amont

Les travaux présentés dans cette partie ont fait l'objet d'une valorisation dans les actes d'une conférence internationale ([Boukhellouf et al., 2022](#)).

4.1.1 Approche et méthodologie choisies pour modéliser la capacité de l'interface amont

On s'intéressera, dans ce chapitre, essentiellement à l'étude de l'interface amont. D'une part, sa configuration est générique, en ce qu'elle se caractérise par la conservation du nombre de voies en son aval et en son amont. Au contraire, la configuration d'une interface aval peut varier d'un terrain à l'autre, que ce soit au niveau de sa géométrie, comme on l'a déjà vu, ou de la distance qui sépare cette interface de la restriction de capacité aval ([Lapardhaja et al., 2021](#)). Aussi, l'interface amont se retrouve, par essence, sur toutes les VR2+, ce qui n'est pas le cas pour les interfaces liées aux discontinuités. Il est en effet possible qu'il n'y ait pas de bretelles le long du linéaire où la VR2+ est déployée ([Daganzo et Cassidy, 2008](#)). D'autre part, l'étude de l'interface amont est motivée par le fait que si une chute de capacité trop importante s'y présente, le risque est de sous-alimenter la congestion récurrente présente en

aval de la VR2+. Les conditions de trafic y seraient alors fluides. Dans cette situation, l'amont étant congestionné, on vient en fait à une situation similaire à celle sans VR2+ déployée, la localisation de la tête de bouchon et son intensité seulement étant modifiées. Déployer une VR2+, dans ce cas, serait inutile.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer la capacité de l'interface amont, notée Ω_U , afin de vérifier si une chute de capacité y est identifiable. La littérature, comme on l'a vu en partie 3.1.2, ne s'étant pas intéressée aux états de trafic au niveau de l'interface amont, on sait pour l'heure uniquement calculer une borne supérieure de cette capacité. C'est une borne supérieure dans le sens où elle n'incorpore pas les effets des CVO. Pour la calculer, notons d'abord Δ la demande en trafic, α la proportion en VOM et n_H (resp. n_G) le nombre de VR2+ (resp. de VG). L'interface amont sature dès lors que la demande, pour l'une des deux classes de véhicules, dépasse la capacité théorique des voies qui lui sont réservées. Cela arrive donc dès que l'une des conditions $\alpha\Delta \geq n_H q_x$ (saturation des VR2+) ou $(1 - \alpha)\Delta \geq n_G q_x$ (saturation des VG) est vérifiée. On en déduit que la borne supérieure de la capacité Ω_U de l'interface amont est donnée par l'équation 4.1 :

$$\Omega_U^{\text{sup}}(\alpha) := \min\left(\frac{n_H q_x}{\alpha}; \frac{n_G q_x}{1 - \alpha}\right) \quad (4.1)$$

Le premier terme, qui décroît avec la proportion en VOM, est l'offre limitante amont des VR2+, tandis que le deuxième, qui croît avec la proportion en VOM, est l'offre limitante amont des VG. Ω_U^{sup} atteint donc un maximum pour une proportion critique $\alpha^* := \frac{n_H}{n_H + n_G}$. Cette proportion correspond ici à une situation où le trafic est équiréparti entre les VR2+ et les VG, chaque voie débitant alors à q_x . À titre d'illustration, une représentation graphique de Ω_U^{sup} est proposée en figure 4.1. Pour $\alpha = 0$, la capacité amont vaut bien celle des deux

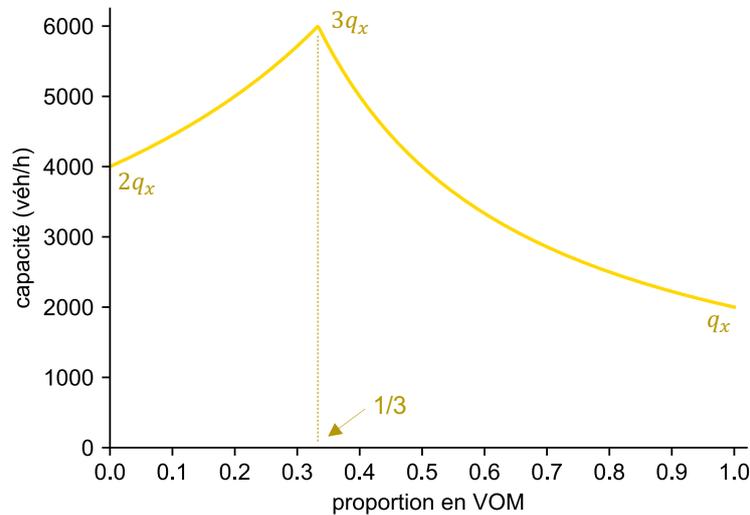


FIGURE 4.1 – Évolution de la borne supérieure de la capacité de l'interface amont avec la proportion en VOM, pour une VR2+ et deux VG et pour une capacité théorique par voie de 2000 véh/h

VG, tandis que pour $\alpha = 1$, elle vaut bien celle de la seule VR2+. La capacité est maximale et vaut la capacité des trois voies lorsque la proportion critique de $1/3$, correspondant bien au rapport entre le nombre de VR2+ et le nombre total de voies en aval de l'interface amont, est atteinte.

Pour quantifier les effets des CVO, et donc obtenir une borne inférieure de Ω_U qui intègre une éventuelle chute de capacité, des données empiriques, qu'elles caractérisent les

trajectoires des véhicules en amont de la VR2+ ou bien le débit voie par voie, ne sont pas disponibles. On opte alors ici pour une approche analytique, dont on détaille maintenant la méthode. Pour introduire cette approche, rappelons que les changements de voie de chaque catégorie d'utilisateurs, obligatoires et opérés en amont de l'interface, traduisent un entrecroisement des flux. En effet, quatre phénomènes se produisent :

- les VOM déjà présents sur l'une des n_H voies qui deviendront en aval une VR2+ restent sur ces voies ;
- les VI déjà présents sur l'une des n_G voies qui resteront une VG restent sur cette voie ;
- les VOM présents sur l'une des n_G voies qui resteront une VG vont changer de voie pour aller sur celle qui deviendra en aval une VR2+ ;
- les VI présents sur l'une des n_H voies qui deviendront en aval une VR2+ vont changer de voie pour aller sur une voie qui restera une VG.

Cet entrecroisement est similaire à celui observé sur une autoroute lorsqu'une bretelle d'entrée et une bretelle de sortie sont très rapprochées.

On fait donc ici l'hypothèse que le fonctionnement de l'interface amont est similaire à celui d'une zone d'entrecroisement, ce que l'on va maintenant chercher à vérifier. Ainsi, la partie 4.1 présente la modélisation analytique de la capacité d'une zone d'entrecroisement avant d'établir son adaptation à l'interface amont.

4.1.2 Modélisation analytique du fonctionnement des zones d'entrecroisement

Commençons par un point de terminologie. Afin de généraliser les résultats pour une zone d'entrecroisement composée de plus de deux voies, on considérera qu'une zone d'entrecroisement est composée de deux *tuyaux* de trafic i et j , chacun composé d'un nombre de voies n_i et n_j .

L'objectif est l'obtention, pour des demandes λ_i et λ_j et des proportions de véhicules déserteurs β_i et β_j connues sur chacun des deux tuyaux i et j , de la capacité juste en aval de la zone d'entrecroisement. Comme on vient de le voir, la zone d'entrecroisement est modélisée, dans l'approche choisie, comme la superposition de deux convergents et de deux divergents. La figure 4.2 schématise alors la situation exposée.

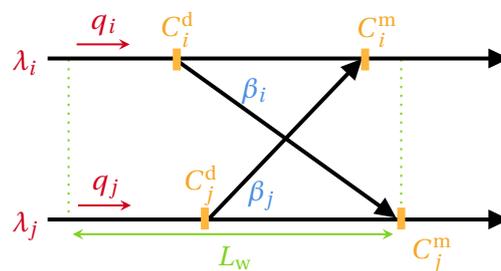


FIGURE 4.2 – Représentation de la situation du trafic dans une zone d'entrecroisement de longueur L_w avec ses quatre discontinuités : un divergent et un convergent pour chaque tuyau. Adapté de (Marczak, 2014)

Cette sous-partie explique et complète le tour d'horizon des outils offerts par les travaux de Marczak (2014), qui sont nécessaires à la création du modèle présenté dans la sous-partie 4.1.3.

4.1.2.1 Modélisation analytique de la chute de capacité au droit d'un convergent

On a vu dans la partie 2.1.2.2.2 que la méthodologie illustrée par le diagramme de Newell-Daganzo était adaptée pour décrire le fonctionnement des convergents. Cependant, supposer que la capacité en aval d'un convergent est une fonction constante des demandes est très simpliste, puisque cela ne permet pas d'intégrer l'impact des chutes de capacité observées au droit des convergents autoroutiers (Elefteriadou *et al.*, 1995 ; Bertini et Leal, 2005). Il faut alors tenir compte des phénomènes microscopiques se déroulant au droit du convergent liés au processus d'insertion suivi par les véhicules lors d'un CVO et de les agréger pour obtenir la capacité résultante. Ainsi, comme on l'a entrevu dans le chapitre précédent, Leclercq *et al.* (2011, 2016a) ont intégré les points suivants à la modélisation afin qu'elle soit plus fidèle à ce qui est observé sur le terrain :

- le convergent n'est pas ponctuel : les véhicules disposent en général d'une bretelle d'accès, dont la longueur sera notée ici L_{ins} , et les positions d'insertion se distribuent le long de cette bretelle ;
- une insertion induit, lorsqu'un véhicule s'insère sur une voie congestionnée, que ce dernier s'adapte aux conditions de trafic du tuyau d'arrivée, en s'insérant à une vitesse v_{ins} correspondant ici à la vitesse du flot $\hat{v}(q_i) := \frac{|w|q_i}{|w|n_i\kappa - q_i}$;
- ils doivent ensuite accélérer jusqu'à atteindre la vitesse libre en aval du convergent, ce qui crée un vide devant chaque véhicule qui vient de s'insérer et participe alors à la chute de capacité ;
- ces vides sont cependant partiellement comblés suivant la position d'insertion du véhicule. En effet, s'il s'insère en un endroit où ce vide est grand, et donc qu'il n'est que partiellement impacté par l'onde de ralentissement générée par le véhicule en aval, alors sa vitesse d'insertion est supérieure à \hat{v} ;

Le calcul de cette nouvelle capacité effective se fait en remarquant que d'après la méthodologie de Newell-Daganzo, sa courbe représentative correspond nécessairement à la frontière entre une zone où les conditions de trafic sont fluides et une zone où les conditions de trafic sont dégradées pour au moins un tuyau.

Supposons donc d'abord que le tuyau i est congestionné et que le tuyau j est fluide. Tout l'objectif est de résoudre en q_i l'équation $q_i + \lambda_j = C_i^m(q_i ; \lambda_j)$, le tracé de la fonction $\lambda_j \mapsto q_i(\lambda_j)$ obtenue par cette résolution donnant alors la courbe de capacité effective.

La théorie variationnelle (Daganzo, 2005) permet, à partir de l'étude du diagramme espace-temps au droit du convergent, à Leclercq *et al.* (2011, 2016a) de montrer, si les véhicules ont des longueurs et des capacités d'accélération homogènes :

$$C_i^m(q_i ; \lambda_j ; v_{\text{ins}} = \hat{v}(q_i)) = |w|n_i\kappa \left[1 + \lambda_j \left(\frac{as_H^2w^2 - 2|w|s_V^2/\lambda_j}{2\mathcal{V}^3} - \mathcal{T} \right) \right] \quad (4.2)$$

où :

- $\mathcal{V} = \sqrt{(|w| + v_{\text{ins}})^2 + \frac{2a|w|}{\lambda_j}}$;
- $\mathcal{T} = \frac{|w| + v_{\text{ins}} - \mathcal{V}}{a}$;
- $s_H^2 = \sqrt{s_t^2 + \frac{2s_x^2}{w^2}}$ est la variance liée au phénomène d'insertion, qui fait apparaître :
 - un écart-type temporel s_t lié à la distribution des écarts intervéhiculaires entre deux insertions ;
 - un écart-type spatial s_x lié à la distribution des positions d'insertion des véhicules ;

— $s_V^2 = a^2 p_{\text{int}} \left[\mathcal{T}^2 + s_H^2 \frac{w^2 (|w| + v_{\text{ins}})}{\mathcal{V}^3} - p_{\text{int}} \left(\mathcal{T} - \frac{s_H^2 a w^2}{2 \mathcal{V}^3} \right)^2 \right]$ est la variance de la distribution des vitesses effectives d'insertion. Elle fait apparaître p_{int} , la probabilité cumulée sur toute la longueur de la bretelle d'insertion, pour une longueur L_{ins} , un débit effectif q_i et une demande d'insertion λ_j donnés, qu'une onde de ralentissement provoquée par un véhicule ayant effectué un CVO interagisse avec un véhicule s'insérant en amont. Le lecteur intéressé par son calcul, dans le cas d'une distribution uniforme des positions d'insertion, est invité à se référer à (Leclercq *et al.*, 2016a).

Supposons maintenant que les deux tuyaux soient congestionnés. La résolution de l'équation $q_i + \lambda_j = C_i^m(q_i; \lambda_j)$ se fait pour $\lambda_j \in [0; \gamma_i Q_{\gamma_i}]$, encore faut-il calculer Q_{γ_i} qui n'est plus obtenu par une simple projection comme c'était le cas pour le modèle de Daganzo. En congestion générale, les débits effectifs se partagent toujours suivant le coefficient de priorité, donc Q_{γ_i} est solution de $C_i^m(q_i = Q_{\gamma_i}; \lambda_j = \gamma_i Q_{\gamma_i}) = (1 + \gamma_i) Q_{\gamma_i}$ et peut s'obtenir numériquement.

4.1.2.2 Modélisation analytique de la chute de capacité au droit d'un divergent

Dans la même veine que pour les convergents, il s'agit ici de compléter les propos de la partie 2.1.2.2.1 en présentant une modélisation expliquant de manière endogène la chute de capacité au droit des divergents. Une bretelle de sortie est proposée aux usagers du tuyau i et une proportion constante β_i d'entre eux l'empruntent (cf. figure 4.3). Les véhicules ralentissent, à partir d'une distance L_a en amont du point de divergence, à une vitesse v_r , et agissent alors en restrictions de capacité mobiles (Newell, 1998) en imposant derrière eux un débit de ralentissement Q_r . Ce ralentissement induit une chute de capacité si le trafic est chargé ou si la proportion de mouvements tournants est élevée.

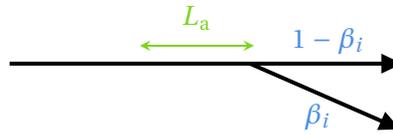


FIGURE 4.3 – Représentation du divergent sur le tuyau i . Adapté de (Marczak, 2014)

Dans une version stochastique du problème, adaptée des travaux de Laval (2006, 2009) par Marczak (2014), un seuil temporel T est établi et correspond à la durée de la perturbation induite par un véhicule roulant à v_r dans la zone d'anticipation. On suppose alors que les écarts temporels sont distribués aléatoirement et suivent une loi exponentielle en deux parties :

- avant le seuil T , les véhicules touchés par la perturbation, les écarts ont alors pour moyenne $1/\beta_i Q_r$;
- après le seuil T , ce n'est pas le cas et les écarts ont alors pour moyenne $1/\beta_i n_i q_x$.

Il vient alors l'expression de la fonction de répartition de la variable aléatoire des écarts temporels intervéhiculaires, H :

$$f_H(h) = \begin{cases} l_1 e^{-hl_1} & \text{si } h \leq T \\ e^{T(l_0-l_1)} l_0 e^{-hl_0} & \text{si } h > T \end{cases}$$

avec $l_0 = \beta_i n_i q_x$, $l_1 = \beta_i Q_r$ et $T = L_a \frac{v_r + |w|}{v_r |w|}$. Dans ce cas, la capacité du divergent est

$$C_i^d = \frac{1}{\beta_i E(H)}, \text{ l'espérance de } H \text{ étant égale à } (1 - e^{-Tl_1})/l_1 + e^{-Tl_1}/l_0.$$

La désertion induit donc une chute de capacité sur le tuyau de départ, mais aussi sur le tuyau d'arrivée. En effet, contrairement au cas d'un divergent routier classique où les véhicules qui désertent suivent leur route sans effectuer de démarche d'insertion, les véhicules qui désertent l'un des deux tuyaux s'insèrent sur un tuyau où le trafic s'écoule. Tout se passe donc comme si les véhicules déserteurs rejoignaient un convergent, comme exposé en figure 4.4, ce qu'il faut alors prendre en compte dans la modélisation pour calculer la capacité du divergent. Cela induit alors que les mouvements tournants et les insertions s'effectuent le long d'une même longueur L_w commune à la composante de divergent et à la composante de convergent.

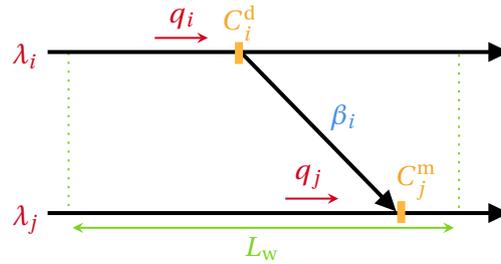


FIGURE 4.4 – Divergent couplé à un convergent. Adapté de (Marczak, 2014)

Continuons à raisonner sur le tuyau i et supposons une nouvelle fois qu'il est congestionné. Cette hypothèse est nécessaire puisque s'il ne l'était pas et que le tuyau j :

- était congestionné, il suffirait en fait d'appliquer le modèle de convergent à ce tuyau j ;
- était fluide, alors toute la demande passerait.

Supposons d'abord que le tuyau j est fluide. Une proportion β_i du flux contraint C_i^d s'insère sur le tuyau j par le processus de convergent décrit en partie 4.1.2.1. La seule différence est que, au vu de la congestion sur le tuyau i , les véhicules s'insèrent à v_r et plus à la vitesse du flot sur le tuyau j qui vaut alors u . Pour le convergent du tuyau j , l'équation de conservation du flux s'écrit alors, pour une demande λ_j donnée :

$$\beta_i C_i^d(v_r) + \lambda_j = C_j^m(v_{\text{ins}} = v_r ; \lambda_i = \beta_i C_i^d(v_r)) \quad (4.3)$$

L'équation 4.3 est numériquement résolue suivant v_r . La valeur obtenue est alors injectée dans l'expression de C_i^d pour obtenir le débit effectif.

Supposons maintenant que les deux tuyaux soient congestionnés. Le débit sur le tuyau j est Q_{γ_j} et celui sur le tuyau i est $\gamma_j Q_{\gamma_j}$. Or, puisque seule une proportion β_i des véhicules sur le tuyau i converge vers le tuyau j , donc est concernée par le modèle de convergent, le débit sur le tuyau i en congestion générale vaut $\frac{\gamma_j Q_{\gamma_j}}{\beta_i}$.

4.1.2.3 Combinaison des deux fonctionnements pour la modélisation analytique du fonctionnement d'une zone d'entrecroisement

On a donc vu que pour une demande λ_j , le tuyau i pouvait avoir un fonctionnement de convergent ou de divergent, les débits effectifs q_i^m et q_i^d associés étant calculés par les modèles développés précédemment. Le fonctionnement retenu par Marczak *et al.* (2015) est celui dont le modèle calcule le débit effectif sur le tuyau i le plus faible entre les deux modèles, *i.e.* $q_i^w := \min(q_i^m ; q_i^d)$. La même démarche est adoptée pour le tuyau j .

La question de la continuité de la fonction obtenue mérite cependant d'être posée : rien ne garantit que le point de congestion générale calculé pour le tuyau i corresponde à celui

calculé pour le tuyau j . Il est alors raisonnable de faire l'hypothèse que lorsque les deux tuyaux sont congestionnés, la capacité effective de la zone d'entrecroisement est partagée entre ces deux tuyaux selon un rapport δ , qui peut être interprété comme un coefficient de partage de la priorité en congestion générale. En couplant cette hypothèse aux résultats obtenus précédemment, on obtient l'équation suivante résumant le fonctionnement en congestion générale :

$$\delta \min \left(Q_{\gamma_i} ; \frac{\gamma_j Q_{\gamma_j}}{\beta_i} \right) = \min \left(Q_{\gamma_j} ; \frac{\gamma_i Q_{\gamma_i}}{\beta_j} \right) \quad (4.4)$$

L'équation 4.4 n'a mathématiquement aucune raison d'être naturellement vérifiée, les coefficients de partage n'étant pas *a priori* liés – ainsi donc que Q_{γ_i} et Q_{γ_j} –, tout comme les proportions de mouvements tournants. Dans le cas où les deux tuyaux sont congestionnés, on peut alors remarquer, en raisonnant sur le tuyau i , que puisque le débit convergeant vers le tuyau j vaut $\gamma_j Q_{\gamma_j}$ et que ce débit diverge du tuyau i dont le débit effectif est Q_{γ_i} , on obtient l'égalité $\beta_i Q_{\gamma_i} = \gamma_j Q_{\gamma_j}$. En faisant le même raisonnement pour le tuyau j , on obtient alors que les conditions suivantes sont réalisées :

$$\begin{cases} \beta_i Q_{\gamma_i} = \gamma_j Q_{\gamma_j} \\ \beta_j Q_{\gamma_j} = \gamma_i Q_{\gamma_i} \end{cases} \quad (4.5)$$

Ce système permet d'aboutir à $\gamma_i \gamma_j = \beta_i \beta_j$. Marczak *et al.* (2015) font alors l'hypothèse raisonnable que les coefficients de partage sont proportionnels, c'est-à-dire qu'il existe un réel positif μ tel que $\gamma_j = \mu \gamma_i$. On obtient alors :

$$\begin{cases} \gamma_i = \sqrt{\frac{\beta_i \beta_j}{\mu}} \\ \gamma_j = \sqrt{\mu \beta_i \beta_j} \end{cases} \quad (4.6)$$

Il reste alors à déterminer le coefficient de proportionnalité, ce que l'on obtient en injectant l'équation 4.6 dans l'équation 4.4, qui peut alors être résolue numériquement. En plus d'assurer la continuité de la courbe de capacité, cette démarche assure que les coefficients de partage sont des variables endogènes du trafic, puisqu'il vient d'être montré que ces derniers dépendent des mouvements tournants et donc de la demande en trafic.

Finalement, la figure 4.5 résume graphiquement la modélisation pour le tuyau i . Le modèle prend en entrée les demandes λ_i et λ_j ainsi que les mouvements tournants β_i et β_j , pour donner en sortie le débit effectif du tuyau i en fonctionnement de zone d'entrecroisement. La capacité de la zone d'entrecroisement est alors $C^w(\lambda_i ; \lambda_j ; \beta_i ; \beta_j) := q_i^w + q_j^w$.

4.1.3 Adaptation à la modélisation de l'interface amont des VR2+

4.1.3.1 Les principes et hypothèses adoptés et leurs conséquences

Pour représenter l'entrecroisement des véhicules en amont des VR2+, on propose d'adapter le modèle présenté dans la partie 4.1.2 en modélisant l'amont comme deux tuyaux. L'un, noté tuyau H¹, est composé de n_H voies et débouche sur les n_H VR2+, et l'autre, noté tuyau G, est composé de n_G voies et débouche sur les n_G VG. L'adaptation du modèle se fait ensuite suivant les principes et hypothèses suivants :

- en congestion générale, on suppose que le débit effectif total se répartit de manière équitable sur les deux tuyaux, le coefficient de partage de la priorité valant alors $\frac{n_H}{n_H + n_G}$;

1. pour *high-occupancy vehicle lane*, terme anglais utilisé pour désigner une VR2+

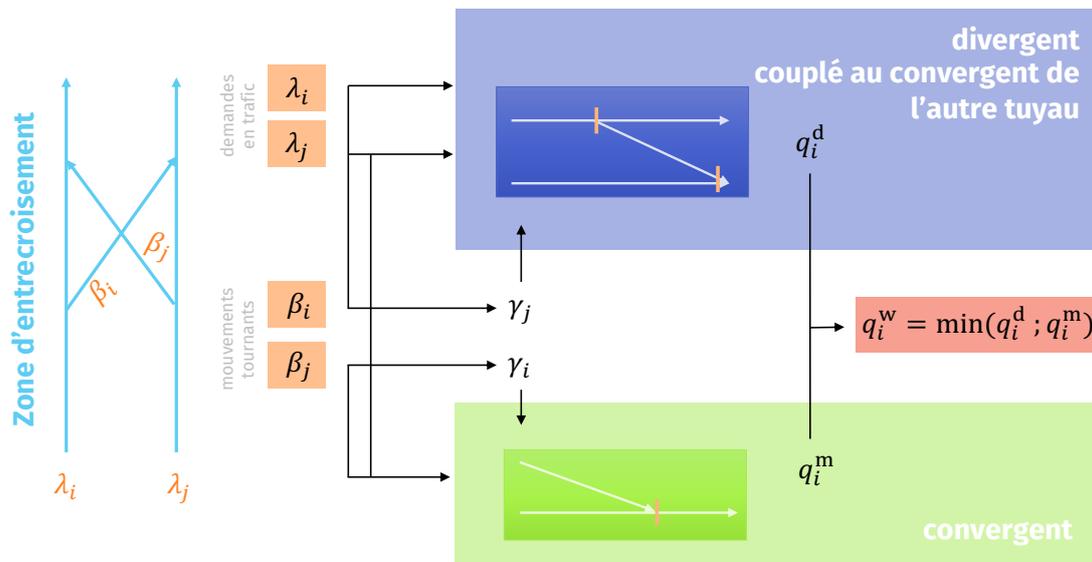


FIGURE 4.5 – Schéma récapitulant le fonctionnement pour l'un des tuyaux de la zone d'entrecroisement, par défaut le tuyau i . Inspiré et adapté de (Marczak, 2014)

- la géométrie d'une zone d'entrecroisement classique circonscrit strictement les manœuvres de CVO sur la longueur L_w où les deux tuyaux sont connectés. Ce n'est pas le cas pour l'amont d'une VR2+ où aucune géométrie routière ne délimite explicitement une telle zone. On fait alors l'hypothèse que les véhicules n'effectuent leurs CVO qu'une fois qu'ils sont informés, par la signalisation, qu'une VR2+ est activée en aval. Puisque la réglementation expérimentale française implique qu'un panneau indique les ayants droit de la VR2+ à 150 mètres de son commencement (Rousic *et al.*, 2020), on optera pour cette valeur pour les applications numériques ultérieures;
- puisqu'on ne connaît pas, en l'absence de données empiriques, le comportement individuel des véhicules à proximité de l'interface, on suppose qu'en congestion, les insertions suivent une loi exponentielle, ce qui est observé empiriquement au droit de convergents (Daamen *et al.*, 2010). On suppose aussi que les véhicules s'insèrent spatialement de manière uniforme le long de la zone où s'effectuent les CVO. Ces deux hypothèses induisent, pour le calcul du fonctionnement de convergent donné par l'équation 4.2, les changements suivants pour l'écart-type s_H (Leclercq *et al.*, 2011 ; Marczak *et al.*, 2015 ; Leclercq *et al.*, 2016a) :

$$— s_t \text{ vaut } \frac{1}{\lambda_j} - \frac{1}{n_j q_x};$$

$$— \text{ et } s_x \text{ vaut } \begin{cases} L_w / \sqrt{6} |w| & \text{si } L_w \leq |w| / \lambda_j \\ \frac{L_w - |w| / \sqrt{6} \lambda_j}{\lambda_j (L_w + (\sqrt{6} - 2) |w| / \lambda_j)} & \text{si } L_w > |w| / \lambda_j \end{cases};$$

- on suppose qu'en amont, la demande en trafic Δ se répartit de manière uniforme sur chaque voie, ce qu'il est raisonnable de penser dès lors que les véhicules ont des caractéristiques de longueur et d'accélération similaires (Duret *et al.*, 2012 ; Leclercq *et al.*, 2016a). En conséquence :
 - les VOM sont répartis de manière uniforme dans le trafic, ce qui implique $\beta_H = 1 - \alpha$ et $\beta_G = \alpha$;
 - on a $\lambda_H = \frac{n_H}{n_H + n_G} \Delta$ et $\lambda_G = \frac{n_G}{n_H + n_G} \Delta$. En combinant ceci avec la première hypothèse sur l'équirépartition du débit en congestion générale, on en déduit que d'après la fonction de projection de Newell-Daganzo, seules deux conditions de trafic sont possibles : une fluidité simultanée des deux tuyaux ou une congestion simultanée des deux tuyaux. Dès lors que la demande dépasse la capacité, une seule valeur

de débit est donc possible. Δ n'est donc plus un paramètre du modèle.

Par cette hypothèse d'équirépartition du flux, le modèle permettant de calculer la borne inférieure de la capacité de l'interface amont n'est donc déterminé que par le seul paramètre α . C'est d'ailleurs aussi le cas pour la borne supérieure de cette capacité présentée en partie 4.1.1, ce qui facilitera la comparaison de ces deux bornes.

La figure 4.6 résume l'adaptation du modèle de zone d'entrecroisement en axant sur le passage de quatre paramètres à un seul.

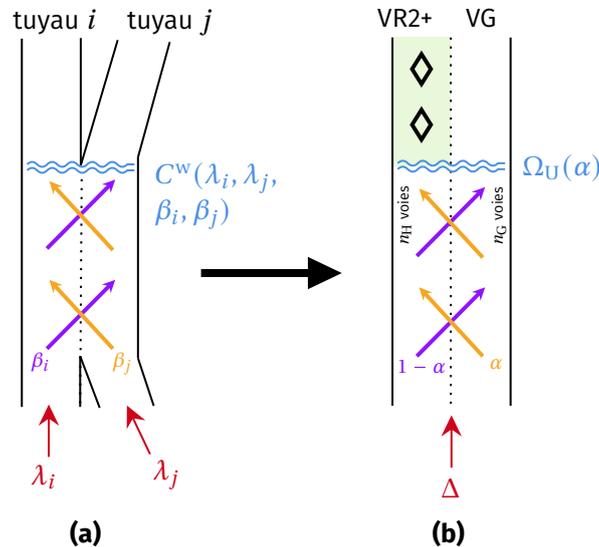


FIGURE 4.6 – Du modèle de zone d'entrecroisement (a) au modèle d'interface amont d'une VR2+ (b)

4.1.3.2 Résultats obtenus et comparaison à la simulation

Il s'agit maintenant de vérifier si le modèle présenté induit une chute de capacité par rapport à la capacité théorique donnée par l'équation 4.1, en utilisant les paramètres du tableau 4.1.

Variable	Notation	Valeur
Vitesse libre	u	70 km/h
Vitesse maximale de remontée de congestion	w	-19,4 km/h
Densité maximale (une voie)	κ	150 véh/km
Accélération	a	3 m/s ²
Longueur de la zone des CVO	L_w	150 m

TABLEAU 4.1 – Valeurs des paramètres utilisés pour générer les résultats

Quand bien même une chute de capacité serait identifiée, la comparaison à une source de données est nécessaire pour tenter de valider le modèle analytique développé. Comme exposé dans le chapitre 3, des données empiriques ne sont pas disponibles, le recours à la micro-simulation a été choisi pour générer cette source de données. Conformément aux conclusions de ce même chapitre, les outils SymuVia et Aimsun, qui ont montré leur validité quant à la reproduction du fonctionnement agrégé des convergents, ont alors été choisis à cet effet. Afin d'assurer la qualité et la cohérence des débits récoltés, la démarche suivante a été adoptée :

- les paramètres microscopiques des simulateurs ont été calibrés de sorte que les paramètres macroscopiques du tableau 4.1 caractérisent l'écoulement du trafic en simulation, à la manière de la méthode vue dans la partie 3.2.1 du chapitre précédent;

- le débit de demande en amont vaut la capacité théorique de l'ensemble des voies, $(n_H + n_G) q_x$ afin de s'assurer de la congestion de l'interface ;
- la capacité se mesurant en aval, les débits sont récoltés 250 mètres en aval de l'interface, de sorte que les véhicules aient récupéré la vitesse libre ;
- la courbe de capacité ne pouvant être obtenue de manière continue en simulation, α varie, pour $n = 2$ (resp. $n = 3$) de 0 à 50 % (resp. à 33 %) par pas de 5 %². Il n'est pas utile d'étudier des proportions plus élevées que la proportion critique, puisque cela signifierait que la demande sur les VR2+ serait plus élevée, en proportion, que celle sur les VG, donc que le déploiement de ces VR2+ est inutile. Plus précisément :
 - pour chacune de ces 11 valeurs de proportion, 15 réplifications sont considérées pour moyenniser les effets liés à la stochasticité des paramètres des différents modèles implémentés dans le simulateur, qui n'ont pas été modifiés ;
 - pour Aimsun, 11 réplifications, *i.e.* 3,9 % du total, ont conduit à un blocage total des véhicules à l'interface. Cela s'explique par le fait qu'un véhicule arrive à l'interface en amont de la mauvaise voie mais qu'il ne peut pas changer de voie en raison de la présence simultanée d'un autre véhicule, sur la voie cible, qui est dans la même situation. Ces réplifications ont été écartées et remplacées par 11 nouvelles ne présentant pas ce problème ;
- une heure de trafic est simulée et les débits sont récoltés dans le dernier quart d'heure afin de s'assurer d'instrumenter une situation de trafic à l'équilibre ;
- le comportement de CVO par défaut n'a pas été modifié, la distance à partir de laquelle ils s'effectuent en amont non plus. Le paramètre L_w n'a donc pas été explicitement implémenté.

Trois méthodes permettent, finalement, de calculer la capacité de l'interface amont, qui est alors représentée sur la figure 4.7 pour deux configurations différentes sur le nombre de voies, celle faisant état d'une VR2+ et de deux VG étant la plus commune en France :

1. le calcul de la capacité théorique exposé dans la partie 4.1.1, faisant office de borne supérieure en ce qu'il n'incorpore pas les effets des CVO ;
2. le calcul de la capacité dérivée du modèle développé dans la partie 4.1.3, faisant office de borne inférieure en ce qu'il incorpore ces effets ;
3. le calcul par la simulation. La variabilité des résultats est présentée, pour chaque proportion simulée, sous forme d'une boîte à moustaches.

Les résultats déduits de cette figure sont les suivants :

- le modèle développé induit effectivement une chute de capacité, puisque la courbe associée à la borne inférieure est en-dessous de celle associée à la borne supérieure, et ce quelle que soit la proportion en VOM ;
- la proportion critique obtenue par le modèle développé, pour le cas asymétrique $n_H = 1$ et $n_G = 2$, de l'ordre de 24 %, est inférieure à celle prévue par le cas n'incorporant pas les effets des CVO. Cela signifie qu'il suffit d'une proportion en VOM moins élevée, et donc d'un entrecroisement moins intense que celui théoriquement prévu, pour que la capacité commence à se dégrader. On peut l'expliquer par l'asymétrie entre n_H et n_G , puisqu'une voie supplémentaire du tuyau G est affectée par les mouvements d'entrecroisement, accentuant alors le volume de désertions et d'insertions de véhicules et donc les instabilités du trafic ;
- au niveau des résultats de simulation :
 - pour les deux cas étudiés, les deux simulateurs font apparaître une chute de capacité, ce qui corrobore davantage l'hypothèse faite en début de chapitre selon

2. pour le cas $n = 3$, puisque 33 n'est pas un multiple de 5, c'est un pas de 3 % qui est évidemment utilisé pour passer de 30 à 33 %

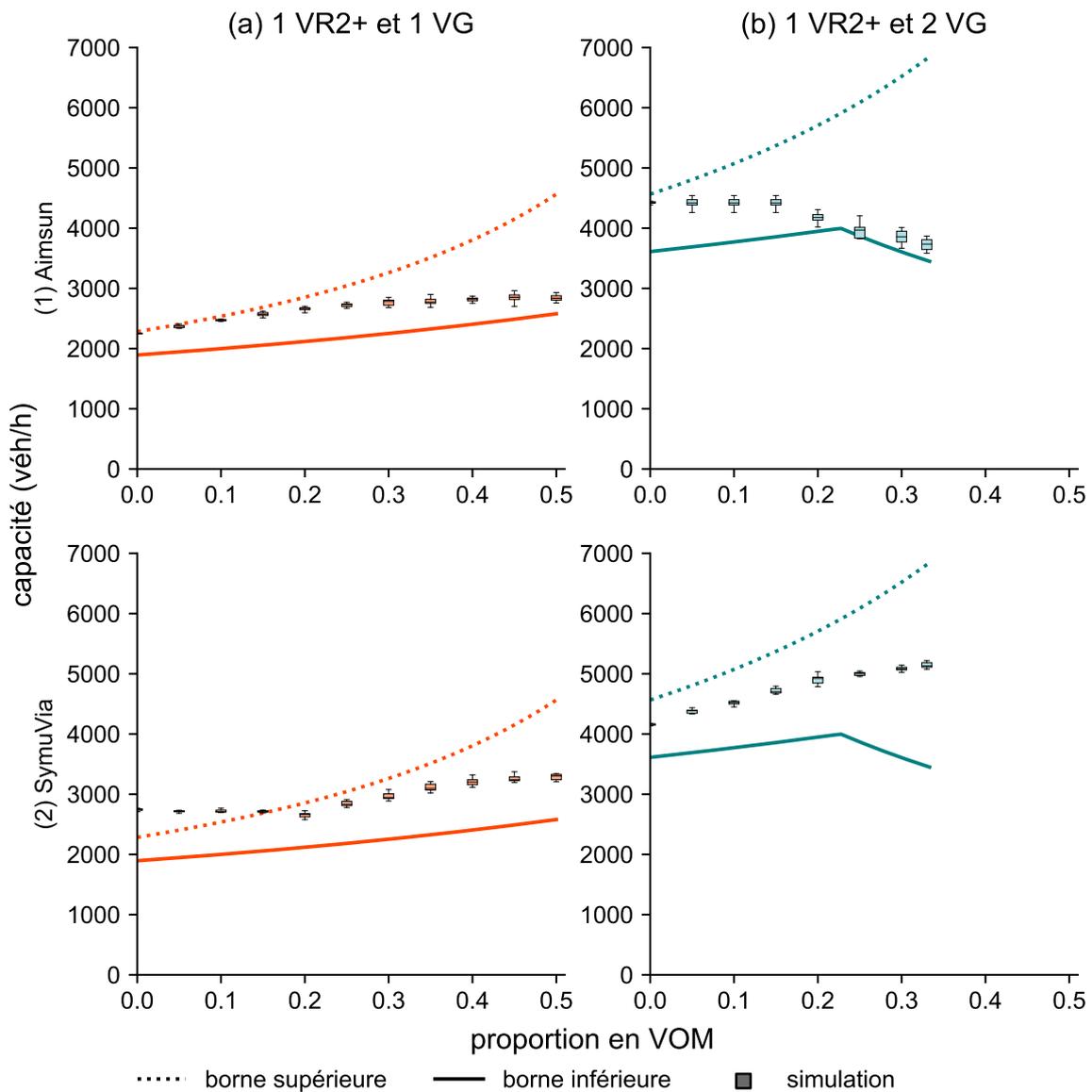


FIGURE 4.7 – Évolution de la capacité de l'interface amont avec la proportion en VOM, pour les paramètres du tableau 4.1, à partir de trois méthodes : calcul d'une borne supérieure n'intégrant pas l'effet des CVO, calcul d'une borne inférieure l'intégrant, et simulation, avec (1) Aimsun et (2) SymuVia, pour (a) une VR2+ et une VG et (b) une VR2+ et deux VG en aval de l'interface amont

laquelle la réorganisation des véhicules induit une telle chute ;

- plus les proportions s'approchent de la proportion critique théorique, plus la chute de capacité augmente, l'écart avec la courbe correspondant à la borne supérieure s'accroissant. La chute de capacité simulée avec Aimsun est cependant plus franche, se rapprochant même de la borne inférieure correspondant au modèle développé ici ;
- il est cependant important de remarquer que pour SymuVia, dans le cas de deux voies au total (figure 4.7(2)(a)), une relaxation du trafic est observée pour des valeurs de proportions inférieures à 15 %, c'est-à-dire que la capacité simulée est supérieure à la capacité théorique. Pour ces mêmes proportions, les résultats simulés par Aimsun montrent une absence de chute de capacité ;
- le cas $n = 3$ (figure 4.7(b)) montre cependant que la chute de capacité simulée

est présente, pour les deux simulateurs, même pour de faibles proportions. Cela renforce l'hypothèse selon laquelle l'instabilité du trafic liée aux entrecroisements augmente avec une voie supplémentaire.

Finalement, bien que les résultats diffèrent entre le modèle développé et la reproduction en simulation, ces deux méthodes indiquent que les entrecroisements liés à la réorganisation induisent une chute de capacité, notamment pour le cas réaliste $n = 3$.

4.1.4 Discussion et ouverture

4.1.4.1 Raffinement du modèle analytique de la capacité de l'interface amont

L'objectif de ce chapitre était de vérifier si l'on pouvait négliger l'impact sur le trafic des CVO induits par la réorganisation des véhicules en amont d'une VR2+. Pour ce faire, une approche analytique a été choisie, ce qui a mené au développement d'un modèle uniquement paramétré par la proportion en VOM. Elle a ensuite été confrontée à une approche en simulation. Les résultats montrent bien que cette réorganisation induit une chute de capacité. Elle est par ailleurs non négligeable puisque, dans le cas d'une prise de voie classique d'une VR2+ pour deux VG, elle vaut au moins 21 % et peut atteindre jusqu'à 50 % pour la proportion théorique critique où le volume des entrecroisements est maximal, comme le montre la figure 4.8. Pour rappel, les chutes de capacité récurrentes mesurées

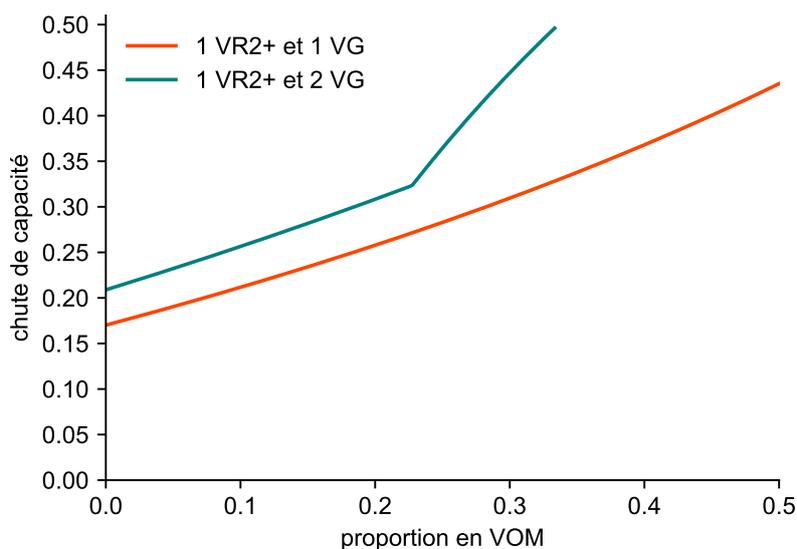


FIGURE 4.8 – Chute de capacité au niveau de l'interface amont, induite par le modèle analytique développé dans ce chapitre et calculée en comparaison du modèle théorique régi par l'équation 4.1

empiriquement au droit des discontinuités classiques atteignent au plus 30 % (Oh et Yeo, 2012 ; Chen et Ahn, 2018). Il est donc possible que le modèle développé surestime la chute de capacité.

Deux pistes peuvent être envisagées pour raffiner le modèle afin de tenter de quantifier plus finement cette chute de capacité, donc de rendre compte de manière plus fidèle de l'estimation des temps de parcours.

La première consiste à modéliser l'amont des VR2+ non pas comme étant constitué de deux tuyaux, mais en considérant l'ensemble de ses n voies comme étant connectées de proche en proche, comme c'est le cas dans la réalité. Le modèle des tuyaux développé ici fait en effet abstraction des changements de voie successifs pour les VOM afin d'atteindre

la VR2+. Il considère aussi qu'une insertion ou une désertion se fait pour un nombre de véhicules proportionnel au nombre de voies du tuyau, ce qui peut être une approximation grossière si ce nombre de voies est élevé. En numérotant les voies de 1, correspondant à la voie rapide, à n , la plus lente, il faudrait donc tenir compte des deux phénomènes suivants :

- les VOM se situant sur les voies $\llbracket 3 \dots n \rrbracket$ doivent obligatoirement effectuer plus d'un changement de voie, tandis que ceux se situant sur la voie 2 n'en effectuent qu'un ;
- les VI se situant sur la voie 1 doivent obligatoirement changer de voie, tandis que c'est optionnel pour ceux sur les voies $\llbracket 2 \dots n \rrbracket$.

Pour passer à la vision voie par voie, au vu de la construction du modèle de zone d'entrecroisement, il suffit de modifier le fonctionnement du modèle de convergent qui en est à la base. Pour ce faire, [Leclercq et al. \(2016b\)](#) considèrent que les CVO des véhicules qui s'insèrent s'effectuent dans une première zone, qui constitue un premier convergent, dont on peut bien sûr calculer la capacité à l'aide de l'équation 4.2. Dans une zone distincte située en amont de ce premier convergent, des CVD vont être déclenchés du fait du ralentissement induit par les CVO amont, ce qui constitue un deuxième convergent mettant en jeu une voie supplémentaire. Le phénomène est illustré sur la figure 4.9 et peut très bien être itéré en considérant davantage de voies. Ce sont donc plusieurs convergents 1 voie + 1 voie donnent 2 voies qui sont étudiés, ce qui permet de braver l'approximation liée à la modélisation en tuyaux. L'enjeu des futurs travaux devrait donc s'attacher à modéliser l'interface amont

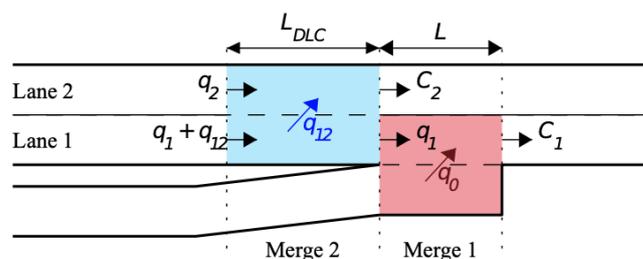


FIGURE 4.9 – Représentation schématique d'un convergent multivoies, mettant en évidence les aires de CVO (en rouge) et de CVD (en bleu), pour une route à deux voies. Tiré de ([Leclercq et al., 2016b](#))

comme une succession plusieurs zones d'entrecroisement, voie par voie, à la manière du modèle qui vient d'être décrit.

La deuxième piste, qui peut venir en complément de la première, consiste à instrumenter le comportement individuel des VI et des VOM en amont de la VR2+. Cela permettrait de mieux connaître la distribution spatiale des changements de voie suivant la catégorie du véhicule, et ainsi de répondre aux questions suivantes, pour enrichir la modélisation analytique :

- sur quelle distance s'effectuent les CVO ?
- en outre, des CVO s'effectuent-ils sur la section où la VR2+ est activée, ce que l'on n'a pas considéré dans la modélisation ?
- pour pouvoir identifier les différentes zones d'insertion évoquées par [Leclercq et al. \(2016b\)](#), comment évolue la proportion en VOM voie par voie le long de zone où s'effectuent les CVO ? en conséquence, comment évolue celle des CVD effectués par les VI ?

Pour y parvenir, le suivi des trajectoires de véhicules peut s'envisager par un enregistrement vidéo. On peut pour ce faire avoir par exemple recours, selon le budget, à des caméras ou au vol stationnaire de drones ou d'hélicoptères, mais cette dernière solution est davantage polluante.

4.1.4.2 Vers une modélisation analytique de l'interface aval et des interfaces aux discontinuités

Pour finir, on propose des pistes pour la modélisation analytique des interfaces qui n'ont été abordées qu'en surface dans ce chapitre. Comme pour toutes les modélisations macroscopiques impliquant des changements de voie, la construction de ces idées s'appuie sur les fonctionnements de convergent et de divergent.

Pour l'interface aval, bien que l'effet de lissage et ses conséquences aient été identifiés, il n'est pas encore quantifié analytiquement. L'étude de l'influence des insertions induites par les CVD, permise par le modèle de [Leclercq et al. \(2016b\)](#), ouvre la porte à cette possibilité. Il serait alors intéressant d'étudier l'influence des paramètres suivants :

- la valeur de la restriction de capacité en aval ;
- la proportion en VOM ;
- la longueur séparant la fin de la VR2+ de la restriction de capacité ;

afin de vérifier si l'on mesure effectivement les hausses de capacité mesurées et simulées de l'ordre de 10 à 20 % ([Menendez et Daganzo, 2007](#) ; [Cassidy et al., 2010](#)). Savoir quantifier ces variations est important afin de s'assurer que la restriction de capacité reste active, et donc que la VR2+ tient son rôle.

Pour les interfaces liées aux discontinuités, on peut aussi modéliser les impacts des CVO successifs des VOM depuis une bretelle d'entrée vers la VR2+ ou depuis la VR2+ vers une bretelle de sortie à partir d'un convergent multivoies. Pour pouvoir connaître avec exactitude la longueur sur laquelle s'effectuent ces CVO, le recours, comme on le préconise pour l'interface amont, d'une étude des trajectoires à partir de données de terrain est dorénavant nécessaire. L'enjeu de la modélisation est d'étudier les conditions de trafic en aval d'une bretelle d'entrée ou en amont d'une bretelle de sortie selon :

- la densité sur les VG et la densité sur la VR2+, variables à relier à la proportion en covoitureurs ;
- le débit de VOM entrant ou sortant par la bretelle.

En effet, dans les deux cas, si le débit des VOM entrants ou sortants est important, il peut induire, par les phénomènes vus tout au long de ce chapitre, une chute de capacité au niveau des VG. Dans le cas d'une bretelle d'entrée, ce débit de VOM entrants, s'il est trop important, peut provoquer des ralentissements intempestifs sur la VR2+, bien qu'on puisse s'attendre, avec l'augmentation de la densité sur les VG et à la difficulté induite alors à changer de voie, à ce que l'écart temporel entre deux insertions sur la VR2+ soit moindre. Dans le cas d'une bretelle de sortie, une augmentation de la densité sur les VG réduit l'espace disponible pour qu'un VOM accepte un créneau d'insertion, ce qui peut induire des ralentissements, voire un arrêt de la circulation, sur la VR2+. Ce phénomène devrait s'accroître avec la demande en VOM voulant sortir, ces démarches étant alors plus fréquentes.

4.2 Dynamique du trafic sur une section où est déployée une VR2+

L'objectif de cette partie est de présenter les différents domaines de fonctionnement d'une VR2+, qui décrivent l'écoulement du trafic sur l'ensemble de la section suivant l'activation de ces têtes de bouchon et les valeurs d'offre et de demande en trafic sur cette section. L'analyse de cet écoulement est alors présentée dans la partie [4.2.1](#), qui aboutit à la présentation des domaines de fonctionnement et de leur pertinence en termes de performance de la VR2+. La partie [4.2.2](#) décrit ensuite la dynamique des états de trafic dans ces différents domaines dans un cas simplifié et adapté aux voies activées de manière permanente,

en développant une méthode analytique considérant l'offre et la demande comme étant constantes. Enfin, la partie 4.2.3 revient sur l'utilité de cette méthode et sur la pertinence de la considération des domaines de fonctionnement, en lien avec la modélisation des VR2+ et avec les objectifs opérationnels d'un projet de déploiement de VR2+.

4.2.1 Les domaines de fonctionnement d'une VR2+

Cette sous-partie décrit les différents domaines de fonctionnement d'une VR2+ suivant la localisation de ses têtes de bouchon. L'approche adoptée ici est chronologique, en ce que le domaine assurant des conditions suffisantes au bon fonctionnement de la VR2+, qui a été le premier à être exploré par les spécialistes du trafic, est d'abord présenté. La généralisation aux autres domaines, ainsi que ses motivations, sont ensuite abordées.

4.2.1.1 Le domaine d'emploi, un ensemble de conditions suffisantes pour assurer la performance d'une VR2+

Le premier chapitre a permis d'exposer le fait que le déploiement d'une VR2+ modifie l'écoulement du trafic sur l'infrastructure autoroutière de par la répartition des flux qu'il induit entre VI et VOM. La dynamique de cet écoulement dépend donc des demandes en trafic, qui sont celles en VI et en VOM. Il dépend aussi de l'offre en aval, et de la congestion qu'elle induit. Le deuxième chapitre a permis d'identifier les lieux du réseau où l'écoulement était modifié par rapport à une situation sans déploiement de VR2+, qui correspondent aux interfaces. Indépendamment du fait qu'une chute de capacité puisse y être identifiée, une telle modification de la répartition des flux induit que les interfaces sont des potentielles têtes de bouchon.

En conséquence, considérons la situation typique de la figure 4.10, présentant n_H VR2+ et n_G VG, où s'écoule une demande Δ , et qui se termine par une restriction dont l'offre est $\tilde{\Omega}$. Les têtes de bouchon sont alors :

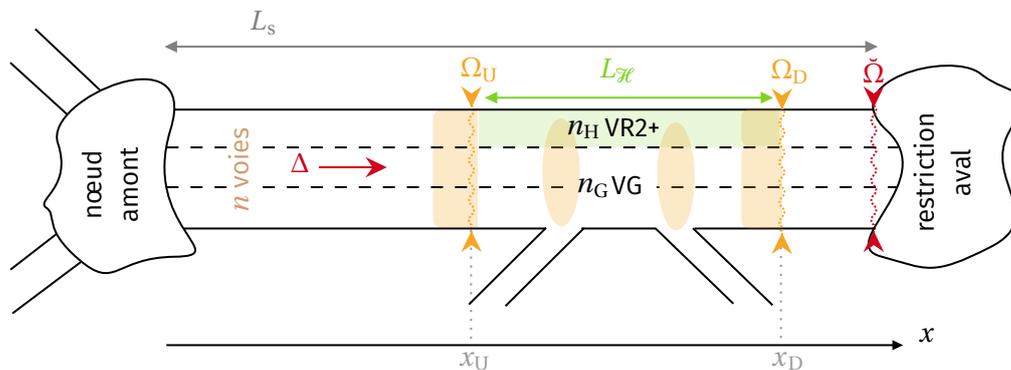


FIGURE 4.10 – Synoptique schématique d'un déploiement typique d'une VR2+ sur autoroute, surlignant la position des potentielles têtes de bouchon en orange

- l'interface amont dont l'offre est Ω_U ;
- l'interface aval dont l'offre est Ω_D . Trois précisions sont à apporter :
 - d'abord, du fait de la réorganisation des véhicules et de l'éventuelle distance séparant la fin de la VR2+ de la restriction aval, il n'y a pas de raison que les conditions de trafic soient identiques à la fois au droit de l'interface aval et au droit de la restriction aval, d'où que Ω_D n'est pas nécessairement égal à $\tilde{\Omega}$;
 - en conséquence, deux potentielles restrictions de capacité, de débits $\tilde{\Omega}$ et Ω_D , se suivent. Notons alors $\Omega := \min(\tilde{\Omega} ; \Omega_D)$. La terminaison de la VR2+ n'étant, par conception, jamais trop éloignée de la restriction aval, Ω correspond donc

à l'offre résiduelle associée à cette restriction, qui s'applique aux alentours de $x = x_D$ si $\tilde{\Omega} \geq \Omega_D$ ou en $x = L_s$ si $\tilde{\Omega} < \Omega_D$. C'est pourquoi, dans toute la suite, on raisonnera sur la valeur de Ω lorsqu'il sera question des conditions de trafic en aval;

- aussi, deux potentielles têtes de bouchon sont en fait présentes : l'une en aval des VR2+ et l'autre en aval des VG. En effet, suivant la répartition du flux entre VI et VOM imposée par la proportion α , le débit de demande alimentant la restriction de capacité aval provient des VR2+ et des VG de manière liée mais dissymétrique. Par exemple, une valeur de α inférieure à la proportion critique α^* implique un débit de demande plus important, en proportion, sur les VG que sur les VR2+. Cela explique alors les situations où une VR2+ est fluide et, simultanément, les VG sont congestionnées, ce qui est un objectif raisonnable par l'exploitation d'une VR2+. On fera alors, dans tout ce chapitre, l'hypothèse que Ω est répartie de manière égale entre ces deux tuyaux, c'est-à-dire que les capacités de chacune des n voies en aval sont égales;
- si des bretelles sont présentes, les interfaces au droit de ces discontinuités. On a constaté en fin de chapitre 2 l'importance des travaux qu'il faut mener pour modéliser ces interfaces. On fait alors l'hypothèse, dans toute la suite de la modélisation menée dans ce chapitre, de considérer soit qu'il n'y a pas de bretelles dans les réseaux étudiés, soit que ces bretelles ne sont pas des têtes de bouchon.

Lorsqu'une congestion se propage à partir de la restriction aval, déployer une VR2+ n'est utile que si cette congestion se propage sur les VG, mais pas sur la VR2+. En faisant l'hypothèse que le déploiement de la VR2+ ne modifie pas l'offre de cette restriction aval, [Menendez et Daganzo \(2007\)](#) et [Daganzo et Cassidy \(2008\)](#) synthétisent alors les conditions auxquelles le déploiement de la VR2+ n'induit pas de tête de bouchon autre que l'aval des VG. Ces conditions forment un *domaine d'emploi*. Simples et suffisantes pour assurer la performance de la VR2+ en ce qu'elles n'induisent aucun retard pour les VOM, elles sont données par le système 4.7, avec les notations de la figure 4.10 :

$$\begin{cases} \forall x \in [x_U ; x_D], q_H(x) < n_H q_x \\ \forall x \in [x_U ; x_D[, q_G(x) < n_G q_x \\ q_H(x = x_D) + q_G(x = x_D) \geq \Omega \\ q_H(x = x_D) < n_H \Omega / n \end{cases} \quad (4.7)$$

Les deux premières conditions assurent que l'ensemble des voies, sur la totalité du tracé des VR2+ déployées, n'est pas congestionné du fait de l'activation des VR2+. La troisième condition assure alors que la congestion sur le réseau est uniquement générée à partir de la terminaison des VR2+, la quatrième condition précisant alors que cette congestion ne se propage pas sur les VR2+.

À partir de ce premier système d'inéquations, [Daganzo et Cassidy \(2008\)](#) précisent qu'il suffit que les deux premières conditions soient vérifiées au droit des têtes de bouchon autres que l'aval des VG. Sur cette base, [Hans et Damas \(2019\)](#) et [Rousic et al. \(2020\)](#) complètent le domaine d'emploi en proposant le système 4.8. Pour l'obtenir, l'hypothèse est faite que le débit de demande arrivant jusqu'à la restriction aval est similaire à celui provenant du nœud amont, ce qui est le cas lorsqu'il n'y a pas de bretelles ou bien lorsque les débits entrants compensent les débits sortants.

$$\begin{cases} \Delta \geq \Omega \\ \alpha \Delta < n_H \Omega / n \\ (1 - \alpha) \Delta < n_G q_x \end{cases} \quad (4.8)$$

De la lecture du domaine d'emploi 4.8, on déduit que des conditions suffisantes à la performance des VR2+ sont :

- que le réseau considéré subisse une congestion (1^{re} inéquation);
- que lorsque les VR2+ sont déployées, elles ne saturent pas du fait de la congestion en aval (2^e inéquation);
- que les VG ne saturent pas en amont (3^e inéquation).

La combinaison des deux premières conditions permet d'obtenir la condition corollaire $\alpha < n_H/n =: \alpha^*$, soit que la non-saturation des VR2+ par l'aval est garantie tant que la demande en trafic sur les VR2+ n'est, en proportion, pas supérieure à celle sur les VG. Enfin, en toute rigueur, la 3^e condition suffisante serait plutôt que l'interface amont ne sature pas, et pas seulement les VG. À partir des enseignements du chapitre 2, on propose de modifier cette condition, de sorte qu'elle soit générique, en y incluant l'offre amont Ω_U , ce qui permet en outre de tenir compte de la chute de capacité :

$$\begin{cases} \Delta \geq \Omega \\ \alpha\Delta \leq n_H\Omega/n \\ \Delta < \Omega_U(\alpha) \end{cases} \quad (4.9)$$

4.2.1.2 Les autres domaines de fonctionnement d'une VR2+

Le domaine d'emploi présenté précédemment n'est cependant qu'un idéal qui ne peut parfois pas être atteint, de manière assumée ou non par l'exploitant. D'une part, lorsqu'une VR2+ est activée sous une modalité permanente comme c'est le cas pour les autoroutes urbaines M6 et M7 de la métropole de Lyon, les arguments politiques motivant le choix de cette modalité permettent à l'exploitant d'assumer alors que la VR2+ ne soit pas utilisée qu'aux périodes de pointe. Ainsi, puisque les conditions de trafic varient tout au long de la journée, il n'y a pas de raison que les conditions suffisantes définissant le domaine d'emploi soient toujours remplies. D'autre part, indépendamment de la modalité d'activation choisie, les conditions de trafic de la période de pointe peuvent varier d'un jour à l'autre (Wunderlich *et al.*, 2018), ou même au sein de cette période de pointe, ce qui peut invalider l'atteinte du domaine d'emploi. Cela motive alors l'étude des autres domaines de fonctionnement possibles, qui induisent donc des conséquences différentes sur la dynamique de la congestion par rapport au domaine d'emploi. De plus, suivant les critères retenus par l'exploitant, on verra que d'autres domaines peuvent assurer la performance de la VR2+ déployée. Cette étude est d'autant plus importante que la doctrine nationale quant à la conception des VR2+ ne fait état que du domaine d'emploi lorsqu'il s'agit d'accompagner les exploitants quant aux études *a priori* relatives à l'opportunité du déploiement de ces VR2+ (Hans et Damas, 2019 ; de Wissocq *et al.*, 2021a).

Suivant l'état de trafic induit par les valeurs de la demande amont, de l'offre aval, de la proportion en VOM, et de l'activation ou non des potentielles têtes de bouchon liées au déploiement des VR2+, douze domaines de fonctionnement existent. Ils sont illustrés sur la figure 4.11 et sont décrits ainsi :

- lorsque l'amont n'est pas une tête de bouchon, *i.e.* $\Delta < \Omega_U(\alpha)$:
 - (1) : la congestion provient uniquement de l'aval des VG, il s'agit du domaine d'emploi décrit dans la partie 4.2.1.1 ;
 - (2) : la section est fluide ;
 - (3) : (resp. (9) :) l'aval des VG et celui des VR2+ saturent, la vitesse de remontée de congestion sur les VG (resp. les VR2+) étant plus rapide, comme on le verra dans la partie 4.2.2.2 ;
 - (7) : la congestion provient uniquement de l'aval des VR2+ ;
 - (11) : l'aval des VG et celui des VR2+ saturent, et puisque $\alpha = \alpha^*$, le débit de demande est équiréparti sur l'ensemble des n voies. La vitesse de remontée de congestion

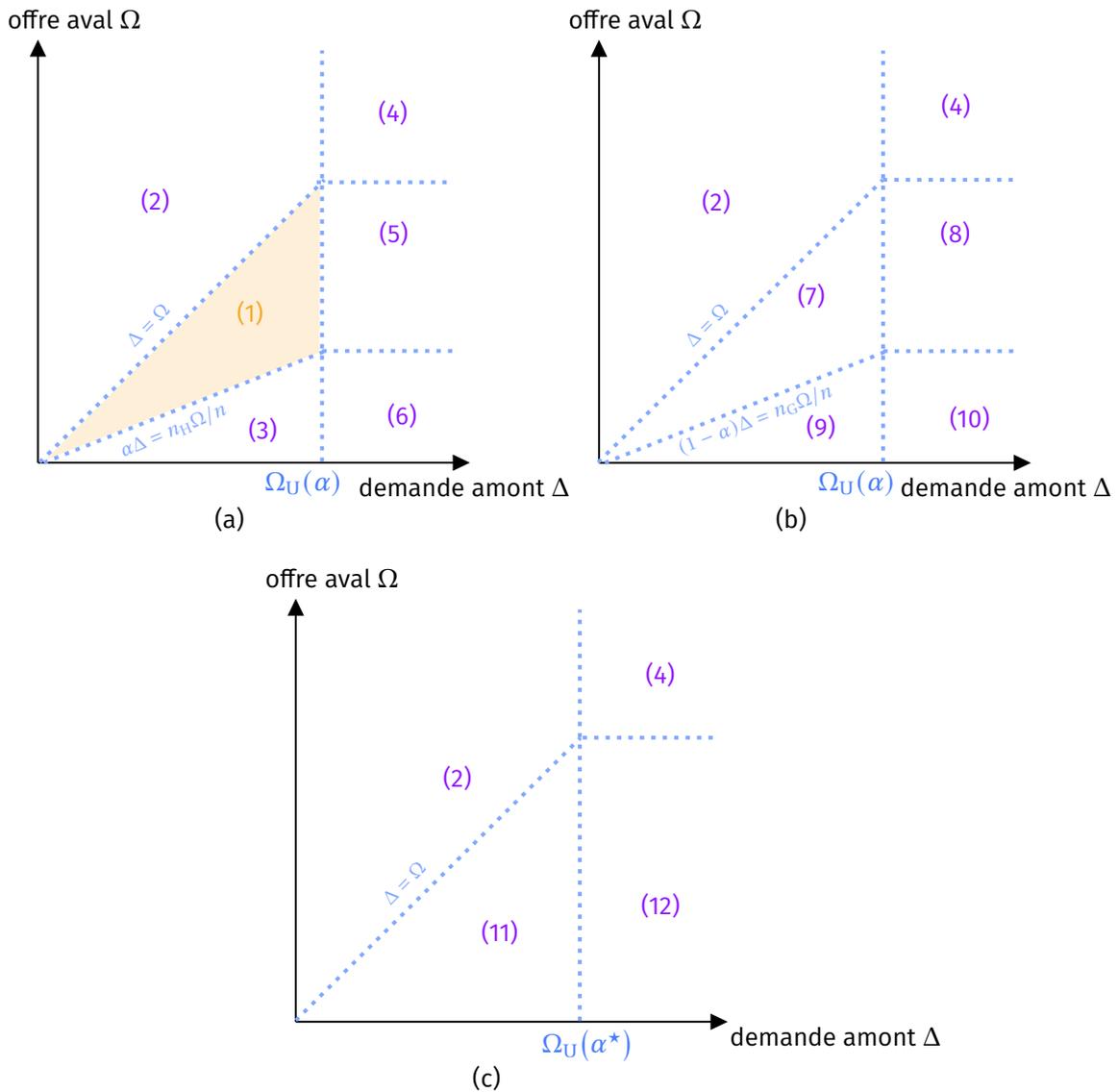


FIGURE 4.11 – Domaines de fonctionnement d'une VR2+ pour (a) $\alpha < \alpha^*$, (b) $\alpha > \alpha^*$ et (c) $\alpha = \alpha^*$

est donc la même sur toutes les voies. Tout se passe alors comme si l'ensemble de la section était un unique tuyau de trafic;

- lorsque l'interface amont sature, *i.e.* $\Delta \geq \Omega_U(\alpha)$, l'interface amont agit alors comme un filtre laissant uniquement passer le débit $\Omega_U(\alpha)$. Les domaines sont dans ce cas :
 - (4) : l'aval des deux types de voie est fluide;
 - (5) : les VG saturent en aval, mais pas les VR2+;
 - (6) : (resp. (10) :) même situation que (3) (resp. (6)), en ajoutant donc la congestion à l'interface amont;
 - (8) : les VR2+ saturent en aval, mais pas les VG;
 - (12) : même situation que (11), en ajoutant donc la congestion à l'interface amont.

Le tableau 4.2 synthétise ces descriptions et indique l'efficacité des différents domaines de fonctionnement suivant un objectif de performance des VR2+ ainsi déployées. Cette performance est évaluée selon le fait que les VOM ont un temps de parcours plus bas que celui des VI, à heure d'entrée identique sur la section. On classe alors les domaines de fonctionnement de la catégorie la plus performante à la moins performante suivant ce critère :

- le domaine (1) assure que les VOM jouissent de conditions fluides sur la totalité de

Domaine de fonctionnement	Localisation de la (des) tête(s) de bouchon			Proportion en VOM	Efficacité du domaine de fonctionnement sur la performance de la VR2+
	amont	aval des VR2+	aval des VG		
(1)			×	$\alpha < \alpha^*$	efficace
(2)				$\alpha < \alpha^*$, $\alpha = \alpha^*$ ou $\alpha > \alpha^*$	— inefficace, mais n'induit pas de congestion; — situation typique, en heure creuse, des VR2+ statiques
(3)		×	×	$\alpha < \alpha^*$	à éviter
(4)	×			$\alpha < \alpha^*$, $\alpha = \alpha^*$ ou $\alpha > \alpha^*$	inefficace
(5)	×		×	$\alpha < \alpha^*$	potentiellement efficace
(6)	×	×	×	$\alpha < \alpha^*$	à éviter
(7)		×		$\alpha > \alpha^*$	contreproductif
(8)	×	×		$\alpha > \alpha^*$	contreproductif
(9)		×	×	$\alpha > \alpha^*$	contreproductif
(10)	×	×	×	$\alpha > \alpha^*$	contreproductif
(11)		×	×	$\alpha = \alpha^*$	inefficace
(12)	×	×	×	$\alpha = \alpha^*$	inefficace

TABLEAU 4.2 – Synthèse des différents domaines de fonctionnement d'une VR2+

la section, contrairement aux VI. Le domaine (5) est similaire, à la différence que la congestion s'installe aussi en amont. Cela peut être acceptable si la gestion de la remontée de congestion n'est pas un enjeu pour l'exploitant, ce qui peut être le cas sur des sections situées au sein de réseaux routiers peu maillés et donc moins sujets aux débordements de congestion sur les sections parallèles. Dans cette situation, on peut dire que ce domaine est efficace;

- les domaines (3) et (6) sont à éviter puisque les VR2+ congestionnent par l'aval. Cependant, la congestion se propageant sur les VR2+ est moins sévère, ce qui garantit un meilleur temps de parcours pour les VOM et permet d'établir que le déploiement est, en théorie, efficace;
- les domaines dits « inefficaces » ((2), (4), (11), (12)) reflètent le fait que les VOM et VI ont des temps de parcours égaux;
- les domaines pour lesquels la proportion en VOM dépasse la proportion critique (de (7) à (10)) sont tous contreproductifs en ce que les conditions de trafic induisent que les VOM perdent du temps par rapport aux VI.

4.2.2 Dynamique liée aux domaines de fonctionnement dans un cas simple de congestion de demande

La dynamique des conditions de trafic induites par les différents domaines de fonctionnement est exposée puis exploitée pour développer un outil analytique simple d'aide à la décision permettant de juger, au moins en première approximation, la performance *a priori* du déploiement d'une VR2+.

4.2.2.1 Méthode utilisée et hypothèses formulées

La description des domaines de fonctionnement permet certes de retenir les configurations d'offre et de demande induisant l'activation des potentielles têtes de bouchon liées aux VR2+, mais elle ne permet pas de décrire la dynamique des états de trafic. La connaissance de cette dynamique permet de calculer les indicateurs utiles à l'appréciation de la performance du déploiement de la VR2+.

Pour décrire cette dynamique et en dériver les indicateurs, on peut recourir, comme on l'a déjà vu, au calcul analytique des états de trafic ou à l'utilisation d'outils de simulation. On retient, pour le reste de ce chapitre, la première solution, en s'appuyant sur le modèle LWR. Le but est en effet d'utiliser la connaissance analytique de la dynamique du trafic afin de développer une méthode permettant d'obtenir les principaux indicateurs de manière rapide. Il en résulte un outil d'aide à la décision notamment adaptable au cas des VR2+ gérées de manière permanente, par exemple certaines voies CCC. Les hypothèses retenues sont alors les suivantes :

- on considère la situation et les notations de la figure 4.10, sans bretelles. La VR2+ est activée en permanence sur la section, fixe, de longueur $L_{\mathcal{H}}$;
- l'offre, imposée en $x = x_D$, ainsi que la demande en trafic et la proportion en VOM, imposées en $x = 0$, sont statiques, c'est-à-dire qu'elles sont constantes au cours du temps. Pour la proportion en VOM, il est raisonnable de penser qu'elle varie peu à court terme, le choix modal variant plutôt à long terme ;
- une légère entorse au point précédent est que la demande en trafic est constante par morceaux. Plus précisément, elle vaut Δ pendant la période de pointe de durée T , puis vaut une demande de résorption $\Delta_{\text{rés}}$ qui correspond à un débit d'entrée plus faible permettant d'éliminer l'éventuelle congestion présente sur la section. En conséquence, l'étude faite ici porte sur une congestion de demande ;

4.2.2.2 Dynamique du trafic dans les différents domaines de fonctionnement

On suppose qu'à $t = 0$, le front de demande Δ commence à débiter depuis l'entrée de la section, ou tout du moins que le débit avant ce temps de référence induit des conditions de trafic fluides en tout endroit du réseau. Avec les hypothèses décrites dans la partie 4.2.2.1, la dynamique est la suivante tant que la demande en entrée ne vaut pas celle de résorption :

- à $t_U^f := \frac{x_U}{u}$, pour les domaines induisant une congestion à l'interface amont, cette congestion apparaît et se propage, d'après la relation de Rankine-Hugoniot, à la vitesse $v_U := \frac{\Omega_U(\alpha) - \Delta}{(n\kappa + \Omega_U(\alpha)/w) - \Delta/u}$;
- à $t_D^f := \frac{L_s}{u}$, pour tous les domaines sauf (2) et (4), la congestion commence en aval. Notons $Q_{\text{int}} := \min(\Delta ; \Omega_U(\alpha))$ le débit offert par l'interface amont et k_Ω la densité décrivant un état congestionné, sur n voies, de débit Ω . $v_G := \frac{n_G \Omega / n - (1-\alpha) Q_{\text{int}}}{n_G k_\Omega / n - (1-\alpha) Q_{\text{int}} / u}$ et $v_H := \frac{n_H \Omega / n - \alpha Q_{\text{int}}}{n_H k_\Omega / n - \alpha Q_{\text{int}} / u}$ sont alors les vitesses de remontée de congestion depuis l'aval des VG et depuis l'aval des VR2+. Pour pouvoir comparer ces deux valeurs dans les domaines (3), (6), (9) et (10) où à la fois les VG et les VR2+ congestionnent par l'aval,

l'utilisation du calcul analytique ne permet pas d'aboutir à la formulation d'une comparaison entre ces valeurs. On utilise alors une méthode de Monte-Carlo, c'est-à-dire que pour une valeur fixée de α , plusieurs valeurs de Δ et Ω ont été tirées au sort, à partir desquelles les valeurs de $|v_G|$ et de $|v_H|$ sont calculées puis comparées. Cela permet de montrer que si $\alpha < \alpha^*$ (resp. $\alpha > \alpha^*$) alors $|v_G| > |v_H|$ (resp. $|v_H| < |v_G|$), donc que la congestion se propage plus vite sur les voies qui sont, en proportion, les plus demandées. On indiquera alors, dans toute la suite, par i le type de voies où la congestion se propage le plus vite, et j l'autre;

- le front de congestion progresse alors et peut remonter jusqu'à l'interface amont. Si c'est le cas, un débit $\tilde{\Omega}$, composé d'une part du débit congestionné remontant des voies i et d'autre part du débit de demande sur les voies j , est imposé à l'interface amont. Ce débit est alors donné par $\tilde{\Omega} = \alpha\tilde{\Omega} + n_G\Omega/n$ (resp. $\tilde{\Omega} = (1 - \alpha)\tilde{\Omega} + n_H\Omega/n$) si $\alpha \leq \alpha^*$ (resp. $\alpha \geq \alpha^*$), i.e. :

$$\tilde{\Omega} = \begin{cases} \frac{1}{1-\alpha} \frac{n_G}{n} \Omega & \text{si } \alpha \geq \alpha^* \\ \frac{1}{\alpha} \frac{n_H}{n} \Omega & \text{si } \alpha \leq \alpha^* \end{cases} \quad (4.10)$$

$\tilde{\Omega}$ est imposé à partir d'un temps critique $t_c := \frac{L_s}{u} + \frac{L_{\mathcal{H}}}{|v_i|}$;

- pour les domaines n'induisant pas de congestion en amont ((1), (3), (7), (9) et (11)), le front de débit $\tilde{\Omega}$ se propage alors à la vitesse $v_{\sim} := \frac{\tilde{\Omega} - \Delta}{(n\kappa + \tilde{\Omega}/w) - \Delta/u}$. Pour les domaines induisant une congestion de l'interface amont ((5), (6), (8), (10) et (12)), ce front de débit $\tilde{\Omega}$ se propage, à la vitesse w , aux dépens du front congestionné de débit $\Omega_U(\alpha)$, ce dernier front disparaissant alors au temps $t_c + \frac{L_{\mathcal{H}}|v_U|}{|v_i|(|v_U| - w)}$;
- traitons enfin la dynamique des cas induisant une congestion sur toutes les voies en aval, et où la congestion se propage plus rapidement sur un type de voies que sur l'autre ((3), (6), (9), (10)), à partir de t_D^f . Le débit fluide sur les voies j , valant $\alpha\tilde{\Omega}$ (resp. $(1 - \alpha)\tilde{\Omega}$) si $\alpha \geq \alpha^*$ (resp. $\alpha \leq \alpha^*$), progresse jusqu'à rencontrer le débit congestionné $n_H\Omega/n$ (resp. $n_G\Omega/n$). Cette collision se fait à $t_c + \frac{L_{\mathcal{H}}|v_j|}{|v_i|(u + |v_j|)}$. Il est alors facile de montrer que $\alpha\tilde{\Omega} < n_H\Omega/n$ (resp. $(1 - \alpha)\tilde{\Omega} < n_G\Omega/n$), donc qu'il y a résorption. Elle se fait à une vitesse v'_j , qu'on obtient à partir de la relation de Rankine-Hugoniot, l'onde de choc atteignant l'aval au temps $t_c + \frac{L_{\mathcal{H}}|v_j|}{|v_i|(u + |v_j|)} + \frac{u}{|v'_j|} \frac{L_{\mathcal{H}}|v_j|}{|v_i|(u + |v_j|)}$.

4.2.2.3 Indicateurs de performance génériques retenus

Deux indicateurs ont été choisis pour rendre compte de la performance du déploiement dans la modélisation analytique adoptée : la position maximale de la congestion sur la section et le temps total perdu minimal par mode (VI ou VOM) sur la section. Le premier rend compte de la composante opérationnelle de cette performance, tandis que le deuxième rend compte de sa composante tactique. Ces indicateurs ont l'avantage d'être génériques, puisqu'on peut en dériver d'autres indicateurs, comme la longueur maximale de la remontée de congestion, les retards moyens par catégorie d'utilisateurs, qui correspond à celui par mode en ce que le retard expérimenté par une personne ne dépend pas du nombre de personnes dans le véhicule qu'elle emprunte. On peut aussi penser à des indicateurs permettant d'apprécier l'impact du déploiement en le comparant à la situation sans déploiement, comme l'allongement relatif de la file d'attente ou l'écart relatif des retards par mode.

4.2.2.3.1 Position maximale de la remontée de congestion

Cet indicateur générique à visée opérationnelle permet d'avoir la connaissance de l'extension spatiale maximale induite par le déploiement de VR2+. En particulier, il permet de savoir si elle atteint le nœud amont de convergence des flux de demande, s'il est identifié et si la protection de ce nœud est un enjeu opérationnel. Comme on l'a vu précédemment, la congestion peut apparaître à trois endroits sur la section étudiée. On considérera alors que la position de la file d'attente, notée x_{csgt} , correspond toujours à celle qui est la plus en amont.

Les explications de la partie 4.2.2.2 permettent d'obtenir le résultat suivant, relatif à la dynamique de la position de la file d'attente la plus en amont :

- si $\Delta \geq \Omega_U(\alpha)$:
 - s'il n'y a pas de congestion en aval, alors $x_{\text{csgt}}(t) = x_U + v_U(t - t_U^f) \forall t \geq t_U^f$;
 - sinon,

$$x_{\text{csgt}}(t) = \begin{cases} x_U + v_U(t - t_U^f) \forall t \in \left[t_U^f ; t_c + \frac{L_{\mathcal{R}}|v_U|}{|v_i|(|v_U| - w)} \right] \\ x_U + w \frac{L_{\mathcal{R}}|v_U|}{|v_i|(|v_U| - w)} + v_{\sim} \left(t - \left(t_c + \frac{L_{\mathcal{R}}|v_U|}{|v_i|(|v_U| - w)} \right) \right) \forall t \geq t_c + \frac{L_{\mathcal{R}}|v_U|}{|v_i|(|v_U| - w)} \end{cases} ;$$
- sinon, $x_{\text{csgt}}(t) = \begin{cases} x_D + v_i(t - t_D^f) \forall t \in \left[t_D^f ; t_c \right] \\ x_U + v_{\sim}(t - t_c) \forall t \geq t_c \end{cases} .$

De cette expression, on peut obtenir l'indicateur retenu, la position maximale de la congestion x_{csgt}^{\max} . Elle se calcule aussi analytiquement en déterminant le lieu d'impact de la file d'attente décrite ci-dessous et du front fluide associé à la demande de résorption $\Delta_{\text{rés}}$.

4.2.2.3.2 Temps total perdu minimal par mode

Le temps total perdu minimal pour le mode m , noté TTP_m^{\min} , se calcule à l'aide des CVC des arrivées et des départs en $x = x_U$ pour l'amont et en $x = x_D$ pour l'aval.

On calcule un temps total perdu dit minimal en ce qu'on considère que la résorption, à partir de $t = T$, se fait avec une demande nulle. En faisant un tel choix, on s'assure que le système routier n'est plus alimenté, et donc qu'aucun retard supplémentaire n'est généré, ce qui garantit que le temps total perdu ainsi calculé est celui qui est minimal. Pour pouvoir différencier le calcul suivant le mode, on génère pour l'aval deux CVC des arrivées et des départs, celles pour les VG où ne passent alors que les VI, et celles pour les VR2+ où ne passent alors que les VOM. Le temps total perdu se compose alors d'abord de l'éventuel temps perdu en amont de l'interface amont, puis du temps perdu en aval des VR2+ (resp. des VG) pour les VI (resp. les VOM). On a alors $\text{TTP}_{\text{VI}}^{\min} = (1 - \alpha)\text{TTP}^{\min}(x = x_U) + \text{TTP}_{\text{VI}}^{\min}(x = x_D)$ et $\text{TTP}_{\text{VOM}}^{\min} = \alpha\text{TTP}^{\min}(x = x_U) + \text{TTP}_{\text{VOM}}^{\min}(x = x_D)$.

Les principes de la partie 4.2.2.2, tout comme les indicateurs qui viennent d'être introduits, ont été implémentés numériquement. Il s'agit maintenant de vérifier que cette méthode permet bien d'obtenir les résultats correspondant aux domaines de fonctionnement décrits en partie 4.2.1.2. Pour ce faire, on couvre les douze domaines de fonctionnement, en choisissant successivement des valeurs de α , Δ et Ω correspondant à un domaine particulier. Le diagramme fondamental et les caractéristiques du réseau sont les mêmes pour tous les domaines explorés, les paramètres associés étant consignés dans le tableau 4.3. La valeur de L_s est volontairement élevée afin de s'assurer que la congestion soit contenue au sein de la section. Ainsi, les valeurs test de x_{csgt}^{\max} entre les différents domaines de fonctionnement sont toutes comparables. Enfin, il est à noter que le modèle analytique de la capacité de l'interface amont développé dans la partie 4.1 a été utilisé pour obtenir les résultats.

Le tableau 4.4 propose d'abord le calcul des indicateurs, par la méthode implémentée numériquement, pour chaque domaine de fonctionnement. Il permet de montrer que dans

Paramètre	Valeur
u	70 km/h
w	-19,4 km/h
κ	150 véh/km
q_x	2282 véh/h
n	3 voies
n_H	1 voie
n_G	2 voies
L_s	35 km
$L_{\mathcal{H}}$	8 km
T	2 h

TABLEAU 4.3 – Paramètres communs aux différents cas de vérification et leur valeur

les cas où la proportion est faible (resp. élevée), la méthode retourne bien des retards minimaux supérieurs pour les VI (resp. les VOM). Comme le montrent les valeurs des indicateurs pour le domaine (2), il n'y a pas de congestion, comme prévu là encore.

Domaine de fonctionnement	α	Δ	Ω	$x_{\text{cgst}}^{\text{max}}$ (km)	$\text{TTP}_{\text{VI}}^{\text{min}}$ (VI·h)	$\text{TTP}_{\text{VOM}}^{\text{min}}$ (VOM·h)
(1)	15 %	$1,75q_x$	$1,5q_x$	22,6	4012	248
(2)	15 %	q_x	$2q_x$	35	0	0
(3)	15 %	$1,75q_x$	$0,5q_x$	17,2	32556	3312
(4)	15 %	$2,25q_x$	$2,5q_x$	15	4839	854
(5)	15 %	$2,25q_x$	$1,5q_x$	14,3	12291	1527
(6)	15 %	$2,25q_x$	$0,5q_x$	11,3	63143	7810
(7)	65 %	$0,75q_x$	$0,5q_x$	25,3	599	1113
(8)	65 %	$2q_x$	$0,75q_x$	11,7	17922	41564
(9)	65 %	$0,75q_x$	$0,25q_x$	24,3	2172	12551
(10)	65 %	$1,25q_x$	$0,5q_x$	19,7	6862	20696
(11)	33 %	$1,5q_x$	$1,25q_x$	30,6	1084	542
(12)	33 %	$1,75q_x$	$1,25q_x$	23,5	2790	1395

TABLEAU 4.4 – Validation de la méthode : calcul des indicateurs pour les douze domaines de fonctionnement

La figure 4.12 présente ensuite les diagrammes espace-temps de la section amont, des VG et de la VR2+, associés aux douze scénarios de vérification du tableau 4.4, et générés suivant la méthode décrite en partie 4.2.2.2. Une couleur verte (resp. rouge) indique un état fluide (resp. congestionné). Plus la couleur est foncée et plus la densité est élevée. Le liseré en pointillés turquoise correspond à la position de la file d'attente. Ces diagrammes font bien apparaître les conditions de trafic décrites dans la partie 4.2.1.2, ce qui permet de valider la méthode.

4.2.3 Discussion et ouverture

L'exploration des domaines de fonctionnement des VR2+ et le développement de la méthode de calcul des indicateurs génériques viennent d'être abordés dans un cas dynamique simple. Ils sont révélateurs des difficultés et des manques dans la modélisation du déploiement des VR2+ ainsi que du décalage existant parfois entre les objectifs opérationnels purement liés à la circulation et ceux des exploitants.

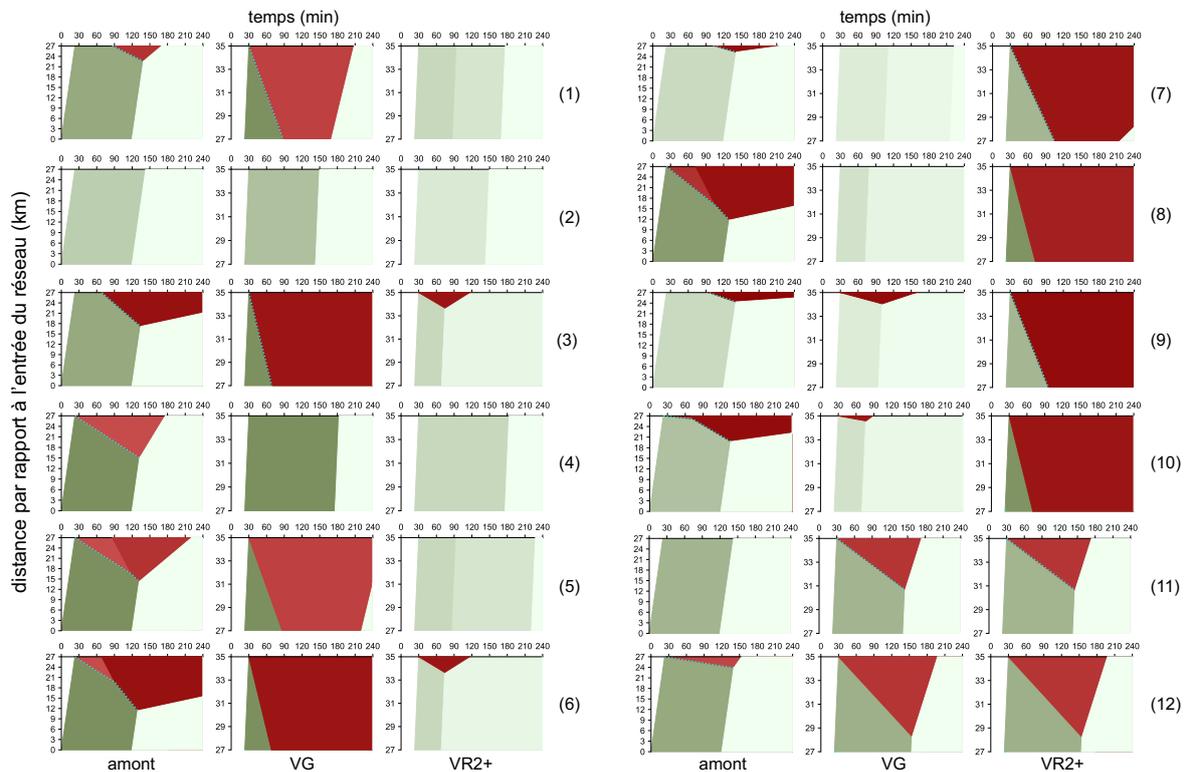


FIGURE 4.12 – Validation de la méthode : diagrammes espace-temps associés aux douze domaines de fonctionnement de VR2+ tels que paramétrés par les tableaux 4.3 et 4.4

4.2.3.1 La performance d'une VR2+ dépend davantage des objectifs opérationnels que du respect absolu du domaine d'emploi

L'exploration des domaines de fonctionnement a permis de confirmer le résultat exposé par [Hans et Damas \(2019\)](#) qu'il n'existe qu'une configuration de conditions de trafic garantissant que les VOM ne subissent pas la congestion de l'aval, au contraire des VI, nommée domaine d'emploi. Elle n'est cependant valable que si la congestion aval ne remonte pas jusqu'à l'interface amont.

Certaines configurations sont à éviter du point de vue de l'optimisation de la circulation, notamment celles où la proportion en VOM est trop élevée, ou encore celles où l'offre aval est bien plus faible que la demande amont. D'autres configurations peuvent cependant être considérées, notamment celles induisant l'activation de la tête de bouchon en amont. Il apparaît donc que le domaine d'emploi n'est qu'un idéal, et que d'autres configurations peuvent garantir la performance du déploiement, selon les objectifs de l'exploitant et les principes qui le guident. Deux motifs opérationnels, entrevus dans le chapitre 1, motivent de plus cette idée. D'une part, certains exploitants n'ont pas d'objectifs relatifs aux temps de parcours et s'inquiètent davantage de la remontée de congestion, tandis que d'autres s'intéressent uniquement au gain de temps des covoitureurs et ne considèrent la remontée de congestion que comme un point de vigilance parmi d'autres. D'autre part, la garantie d'un temps de parcours compétitif, comme espérée à partir du déploiement d'une VR2+, n'est qu'un incitatif tactique parmi d'autres sur lesquels appuyer dans le système des freins et leviers à la pratique du covoiturage. On peut alors citer la hausse du confort liée à la sensation d'aller plus vite en empruntant la VR2+, comme l'indiquait François Jeanjean, ou encore la hausse des prix des carburants incitant à covoiturer pour partager les frais.

En partant de ce constat, en restant cependant dans des considérations opérationnelles permettant une mesure de la performance par les outils de la théorie du trafic, un outil simple d'aide à la décision analytique a été développé dans la présente partie. Il permet d'obtenir

des indicateurs génériques rendant compte de la performance d'un projet de déploiement de VR2+. Le choix a été fait ici, pour des raisons de traçabilité et de facilité d'utilisation, de considérer l'offre et la demande en trafic constantes pendant la période de pointe. Pour les mêmes raisons, la VR2+ est activée en permanence, ce qui permet alors d'avoir un ordre de grandeur des indicateurs pour le cas le moins souple et le plus contraignant possible de gestion. Aussi, en considérant différentes valeurs d'offre et de demande, traduisant par exemple successivement un jour à fort trafic et un jour à faible trafic, elle permet d'avoir un encadrement de ces indicateurs. Ces éléments permettent alors de vérifier, au moins en première approximation, si le déploiement d'une VR2+ est cohérent suivant les objectifs opérationnels du projet.

4.2.3.2 Vers l'utilisation d'outils de simulation dynamique

L'amélioration de la méthode développée pourrait considérer les cas de congestion d'offre. Pour répondre à ce problème, la modélisation de l'offre et des demandes en fonctions constantes par morceaux pourrait être considérée. Cependant, la description de la dynamique du trafic pour le cas simple de demandes et d'offre constantes a montré que l'utilisation analytique du modèle LWR était fastidieuse. La description analytique de la généralisation des interactions entre les différents états de trafic induits par la succession des différentes valeurs d'offre et de demandes peut donc se révéler être très complexe.

Il semble alors que le recours aux outils de simulation dynamique du trafic, plus efficaces au moins en termes de facilité d'utilisation et de traçabilité, soit plus utile. Cela montre bien que la méthode développée, et donc l'utilisation des domaines de fonctionnement, est une première étape consistant en la vérification brute de la performance de la VR2+. L'étape suivante consiste en l'approfondissement de l'étude d'opportunité de trafic en utilisant ces outils. Cette utilisation semble plus adaptée pour évaluer les VR2+ selon le contexte de la réglementation française et l'appropriation qu'en font les exploitants. Par exemple, l'évaluation de l'efficacité d'une modalité d'activation adaptative, qui s'appuie sur le dépassement de seuils de trafic, induit par essence une étude sur différentes périodes de pointe, c'est-à-dire sur différents couples de profils temporels d'offre et de demandes. Quant aux outils utilisables, on peut penser à ceux de simulation macroscopique, notamment ceux s'appuyant sur le principe de suivi des ondes de choc (Henn, 2005). Ce dernier consiste à calculer les dates et lieux d'impact des différents états de trafic générés par la variation temporelle, considérée comme condition aux limites, de la demande, en amont, et de l'offre, en aval. Le principal inconvénient est, en conséquence des travaux exposés dans la partie 4.1, la connaissance encore floue des conditions de trafic aux interfaces. On peut aussi penser aux outils de simulation microscopique, bien que le comportement individuel des conducteurs, notamment les changements de voie, au niveau des interfaces soit très peu renseigné. Actuellement, aucune solution, analytique ou de simulation, n'est donc parfaite pour modéliser l'impact du déploiement d'une VR2+.

Troisième partie

**Vers l'évaluation générique de la
performance tactique d'une VR2+**

Chapitre 5

Méthode d'évaluation de la performance d'une VR2+ dans le contexte opérationnel français

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode d'évaluation *a priori* de la performance d'une VR2+ française à l'échelle d'une période de pointe, dans le but de délimiter leur potentiel quant à l'enclenchement d'un report modal vers les mobilités partagées. La méthode proposée vise à être générique. Elle ambitionne, en effet, d'évaluer à la fois l'influence de la modalité de gestion de l'activation et de la désactivation, mais aussi de la VLA, sur cette performance. Le chapitre 1 a en effet permis de mettre en évidence que ces deux caractéristiques sont spécifiques du contexte opérationnel du déploiement des VR2+ sur les VSA françaises. En conséquence de cette particularité nationale, l'influence de ces deux caractéristiques sur la performance de ces VR2+ n'a pas été explorée dans la littérature internationale. De plus, les enjeux autour du développement du covoiturage reposent en partie sur celui des VR2+, qui sont déployées dans ce contexte opérationnel spécifique. Il apparaît alors crucial d'inclure ces spécificités dans les dimensions de l'évaluation proposée.

L'une de ces spécificités, l'AVLA à 50 ou à 70 km/h pour des raisons supposées de limitation de l'insécurité routière, pose en particulier question, notamment lorsque la VLA d'avant-projet est de 110 ou de 90 km/h. Elle peut paraître restrictive pour les usagers, la VLA pouvant alors être abaissée de 60 km/h – en passant de 110 à 50 km/h – en période de pointe par rapport à la situation d'avant-projet. Au vu du manque de recul sur les VR2+ en France, il peut s'entendre que la prudence soit de mise et donc qu'un seuil de vitesse très bas soit imposé, dans un premier temps, pour des raisons de sécurité. Cependant, la réflexion autour de la valeur de ce seuil ne peut pas négliger les critères liés à la performance tactique de la VR2+. Un tel AVLA ne doit en effet pas nuire à la crédibilité de la démarche de déploiement de cette infrastructure dans une perspective de transition écologique et sociale. Cette crédibilité se dégage principalement, ainsi qu'on l'a vu dans le chapitre 1, du fait que les temps de parcours des VOM doivent rester attractifs. La méthode permettra donc de traiter la question de la justification, ou non, de la pertinence de cette stratégie préventive, qui est au cœur du contexte opérationnel français.

On propose alors ici de d'abord référencer les mécanismes d'un AVLA et ses conséquences sur les conditions de circulation, la sécurité routière et la qualité de l'air. Dans le sillage de cette revue et de ses conclusions, produites dans la partie 5.1, la construction de la méthode est justifiée et proposée dans la partie 5.2.

5.1 Catégorisation et impacts des stratégies d'AVLA eulériennes sur les autoroutes urbaines

5.1.1 Principe général et catégorisations

5.1.1.1 Principe général de ces stratégies

Le principe général qui prévaut lors de la mise en place d'un AVLA est que les usagers de la route sont informés d'une nouvelle VLA à respecter. Cela se fait soit par la signalisation verticale, qu'elle soit permanente ou temporaire via les panneaux à messages variables (PMV) présents le long de l'infrastructure, soit, pour des technologies plus avancées, par des communications véhicule-à-véhicule ou infrastructure-à-véhicule (Lu et Shladover, 2014). On dira, dans le premier cas, que la régulation a une visée eulérienne, le changement de vitesse s'appliquant en un endroit précis à tous les véhicules composant le flux de trafic passant en ce point. Dans le second cas, on dira qu'elle a une visée lagrangienne, en ce que la consigne s'applique de manière individuelle aux véhicules. On s'intéressera ici uniquement aux stratégies eulériennes sur les autoroutes urbaines, les VSA françaises entrant dans cette catégorie.

5.1.1.2 Catégorisation par méthode de déclenchement

Les stratégies d'AVLA eulériennes peuvent reposer sur des critères de déclenchement temporels et de gestion différents. L'étude de la littérature scientifique amène alors à distinguer les stratégies :

- *statiques* : sur une période de temps suffisamment longue, la VLA est fixée à une certaine valeur. Cela peut être, par exemple, le temps d'une demi-journée (Lee et al., 2006 ; Soriguera et al., 2017), ou bien jusqu'à nouvel ordre (Punzo et al., 2012) ;
- *dynamiques*. On y distingue celles qui sont :
 - *prédéterminées* : elles sont appliquées suivant un plan temporel prédéfini, et donc, comme pour les stratégies statiques, ne s'adaptent pas aux conditions de trafic. Leur visée est surtout réglementaire, par exemple pour faire respecter une VLA liée à l'activation d'une VR2+, dans le cadre défini par l'IISR et le Cerema (Glasson et al., 2021 ; Clairais, 2022).
 - *adaptatives* : elles sont plus communément dénommées stratégies de régulation dynamique des vitesses (RDV). Elles utilisent les données de trafic (débit, vitesse, densité) recueillies sur les boucles de comptage présentes le long de l'infrastructure, ou encore des données météorologiques s'il s'agit de réagir à des conditions climatiques comme la pluie (Rämä, 1999). Si, à un instant donné, l'une de ces valeurs dépasse un seuil préalablement établi et dépendant de l'objectif souhaité, alors le système s'adapte en déployant un AVLA permettant de répondre à cet objectif (Lu et Shladover, 2014 ; Khondaker et Kattan, 2015 ; Glasson et al., 2021). On distingue les stratégies :
 - *réactives* : elles s'appuient uniquement sur l'analyse en temps réel des données de comptage pour être déployées (Lin et al., 2004 ; Highways Agency, 2007 ; Duret et al., 2012 ; Soriguera et al., 2013) ;
 - *proactives* : elles utilisent les données de comptage en entrée d'un modèle prédictif de l'état futur du trafic (Hegyi et al., 2008 ; Zegeye et al., 2012 ; Hadiuzzaman et al., 2013). En comparant les variables caractéristiques de ces états prédits avec des valeurs seuil, la stratégie est déployée, ou pas. À condition que la prédiction soit réaliste, ces stratégies permettent alors

d'anticiper la dégradation à éviter pour remplir l'objectif opérationnel. Elles permettent aussi d'éliminer l'éventuel décalage que l'on peut observer pour les stratégies réactives. Les stratégies les plus récentes utilisent les techniques de l'intelligence artificielle pour améliorer leur efficacité (Kušić *et al.*, 2020 ; Fauchet *et al.*, 2022).

Profitions de cette introduction aux catégorisations des stratégies d'AVLA pour décrire un algorithme simple d'AVLA dynamique prédéterminé. Il a été développé dans le cadre du projet de déploiement de VR2+ sur l'autoroute A7, entre Ternay et Saint-Fons, au sud de Lyon (Clairais, 2022). En considérant une partie de VSA divisée en S sections, le tableau 5.1 donne le formalisme utilisé pour cette description.

Variables d'entrée	Notation
Nombre de sections	S
Longueur de la section n° i	ℓ_i
VLA sur la section n° i à l'étape n° k	$u_{i,k}$
VLA cible pour la section n° i	$u_{i,c}$

TABLEAU 5.1 – Introduction de l'algorithme \mathcal{A} : notations utilisées et formalisme

Supposons que les conditions de trafic soient fluides pendant toute la phase d'harmonisation. En termes de contraintes sur l'abaissement des vitesses, rappelons que l'article 178 de l'IISR stipule que :

- la VLA d'une section à réguler peut être momentanément abaissée par incréments de 10 km/h ou de 20 km/h ;
- la diminution de VLA ne doit pas dépasser 20 km/h entre deux panneaux consécutifs ou, sur une période donnée, sur un seul panneau.

Cela se traduit, pour la section n° i à l'étape n° k , par la contrainte temporelle $u_{i,k-1} - u_{i,k} \leq 20$ km/h et par la contrainte spatiale $u_{i-1,k} - u_{i,k} \leq 20$ km/h. Ces deux contraintes ne sont cependant pas suffisantes, les premiers véhicules venant de la section i pouvant subir un différentiel de vitesse de 40 km/h en arrivant sur la section $i + 1$ (Clairais, 2022). Il faut alors ajouter une condition assurant que les vitesses sur deux sections successives ne peuvent être simultanément abaissées si leur différentiel de vitesse est supérieur à 20 km/h, *i.e.* $u_{i,k} - u_{i-1,k-1} \leq 20$ km/h. Pour faire respecter cette dernière condition, on passe à l'étape suivante lorsque le temps de parcours à vide le plus long, sur l'ensemble des sections, est passé.

En tenant compte de toutes ces contraintes, on obtient l'algorithme d'harmonisation \mathcal{A} , dont les paramètres sont ceux présentés dans le tableau 5.1. Ses principes sont illustrés sur la figure 5.1.

5.1.1.3 Catégorisation par objectif opérationnel

Comme pour toute stratégie de régulation, l'AVLA agit sur les conditions de trafic et a donc un impact sur les trois principales externalités liées au trafic autoroutier : la congestion, l'insécurité routière et la pollution de l'air (Buisson, 2014 ; Domínguez Frejo *et al.*, 2019). Plus précisément, les objectifs opérationnels visés sont :

- *l'amélioration des conditions de circulation*. Il s'agit de prévenir la congestion, qu'elle soit récurrente ou liée à un événement non prévu. Pour ce faire, la régulation s'applique par deux principales méthodes :
 - *l'homogénéisation des comportements de conduite* dans le but de mieux occuper les voies pour augmenter la capacité de l'infrastructure (Smulders, 1990 ; van den Hoogen et Smulders, 1994 ; Duret *et al.*, 2012) ;

Données : S ; $\forall i \in \llbracket 1 .. S \rrbracket$: ℓ_i ; $u_{i,0}$; $u_{i,c}$

$k = 0$

tant que au moins une VLA u_i est différente de sa vitesse cible $u_{i,c}$ **faire**

pour chaque section i **faire**

si $u_{i,k} > u_{i,c}$ **alors**

si $i = 1$ **alors**

$u_{i,k+1} = u_{i,k} - 20$

sinon

$u_{i,k+1} = \max(u_{i,k} - 20 ; u_{i-1,k} - 20)$

fin

fin

 attendre $\max_i \left(\frac{\ell_i}{u_{i,k}} \right)$

$k \leftarrow k + 1$

fin

fin

activer la VR2+

ALGORITHME \mathcal{A} – Harmonisation des vitesses préalable à l’activation d’une VR2+, tiré de (Clairais, 2022)

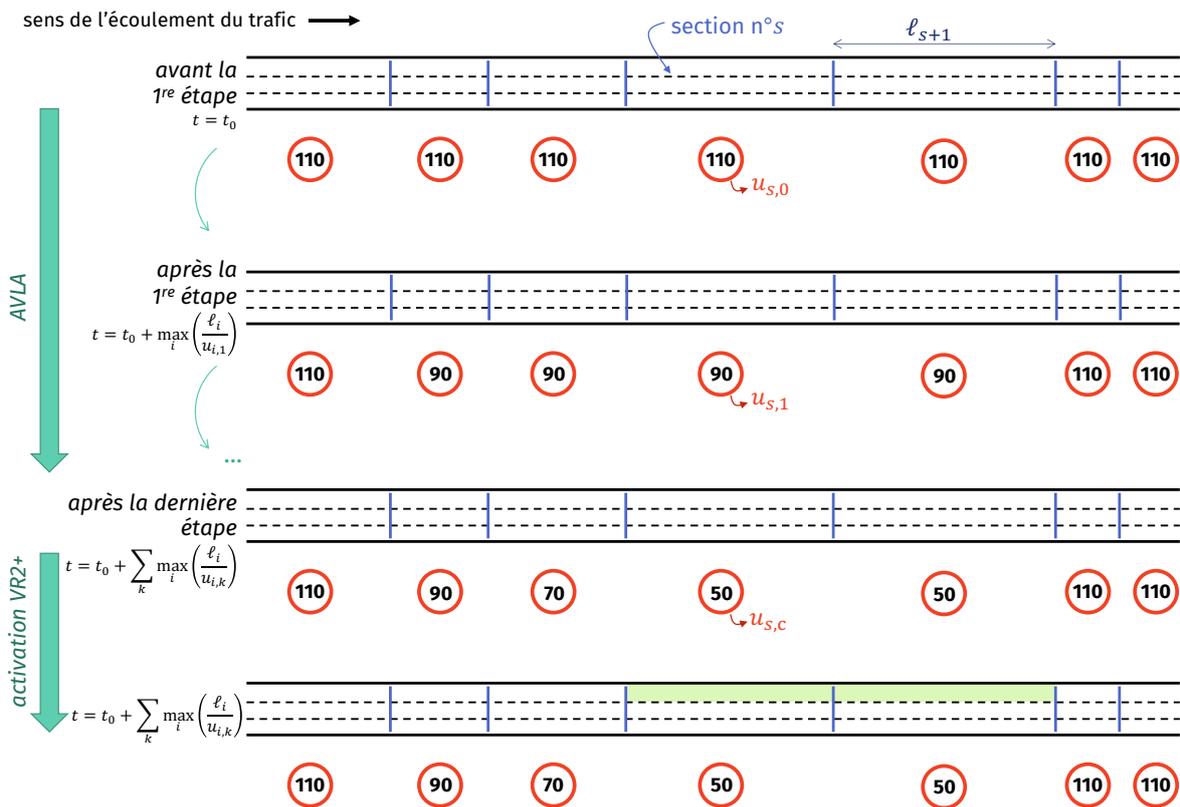


FIGURE 5.1 – Illustration de l’algorithme \mathcal{A} : première et dernière étapes puis activation de la VR2+

- le *filtre de débit* en amont d’une restriction de capacité, de sorte à ne pas générer de congestion au droit de ce point dur (Hegyi *et al.*, 2005, 2008 ; Carlson *et al.*, 2010).
- l’*amélioration de la sécurité routière*. Il s’agit de diminuer le risque d’accidents sur les VSA, très empruntées en périodes de pointe, ainsi que leur gravité. Si la congestion est installée en aval, une méthode ressort, celle de la *protection de queue de bouchon*,

consistant à abaisser la vitesse en amont pour éviter les décélérations brusques (Lin *et al.*, 2004 ; Glasson *et al.*, 2021).

- *l'amélioration de la qualité de l'air*. Il s'agit de réduire à la fois la surconsommation de carburant et les émissions de polluants qu'elle induit. Cependant, considérer la quête de ces bénéfices environnementaux comme un objectif à part entière, et non plus annexe, est relativement récent (Zegeye *et al.*, 2012 ; Soriguera *et al.*, 2013 ; Grumert *et al.*, 2018).

Depuis les années 1990, la majorité des stratégies d'AVLA s'attachent en priorité à l'objectif d'amélioration des conditions de circulation (Lu et Shladover, 2014). Cela n'empêche pas l'évaluation simultanée des impacts sur les externalités liées aux autres objectifs.

5.1.2 Impacts sur les conditions de circulation

5.1.2.1 Homogénéiser le trafic en conditions fluides pour augmenter l'offre de l'infrastructure

À partir des années 1990, des études font état, à partir d'observations empiriques, du fait qu'un AVLA participe à l'homogénéisation du trafic en conditions fluides (Smulders, 1990 ; Zackor, 1991 ; van den Hoogen et Smulders, 1994). Ces observations sont relatives à une fluctuation moins importante, lorsque la VLA est moins élevée, de la vitesse des véhicules, ce que l'on appelle l'harmonisation des vitesses (Ma *et al.*, 2016). Cette harmonisation implique l'homogénéisation du trafic. Ceci se traduit par une meilleure occupation des voies et, en conséquence, par une augmentation de la capacité de l'infrastructure. Ce phénomène d'homogénéisation a été expliqué une vingtaine d'années plus tard en détail (Duret, 2010 ; Duret *et al.*, 2012). Il faut au préalable revenir sur le phénomène de montée en charge du débit sur les autoroutes.

Lorsque la VLA est élevée en conditions fluides, une part non négligeable de véhicules ne circulent pas à cette vitesse, que ce soit pour des raisons mécaniques ou réglementaires – pour les poids lourds, notamment –, ou bien par choix. Ces véhicules occupent alors la voie dite lente, qui est située la plus à droite en France. Cependant, les véhicules plus rapides, désirant rouler à la VLA indiquée, doivent circuler sur la voie de droite, conformément au Code de la route.¹ Il est à noter que dans d'autres pays, notamment aux États-Unis, cette obligation pour le conducteur à choisir une voie en fonction de la vitesse de son véhicule n'existe pas. Lorsqu'un véhicule plus lent se trouve devant ces véhicules plus rapides, ces derniers effectuent un CVD vers la voie adjacente puis se rabattent à nouveau sur la voie de droite après avoir dépassé ce véhicule. Lorsque le débit total est soutenu, cette manœuvre est plus difficile et moins confortable à effectuer, d'une part à cause d'un nombre de véhicules sur les voies adjacentes plus élevé, rendant le premier changement de voie plus difficile ; d'autre part à cause du nombre lui aussi plus élevé de véhicules sur la voie lente, impliquant de répéter cette démarche de dépassement plus fréquemment. Ainsi, pour pouvoir circuler à la VLA indiquée dans une situation de densification du trafic en conditions fluides, les véhicules empruntent plutôt les voies les plus à gauche. Ainsi, en conséquence de cette hétérogénéité des vitesses, la voie lente est sous-utilisée, ce qui induit une chute de capacité de l'infrastructure. Cette observation de la sous-utilisation a été validée au niveau macroscopique par l'analyse de données de boucles sur l'autoroute A7, en France (Duret, 2010 ; Duret *et al.*, 2012). La figure 5.2 montre en effet qu'à mesure que le débit total augmente, celui sur la voie de droite augmente jusqu'à atteindre une certaine valeur critique, au-delà de laquelle il diminue.

Lorsqu'un AVLA est imposé, en lien avec les heuristiques des années 1990 évoquées au

1. Source : article R412-9 du Code de la route, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_1c/LEGIARTI000045025503

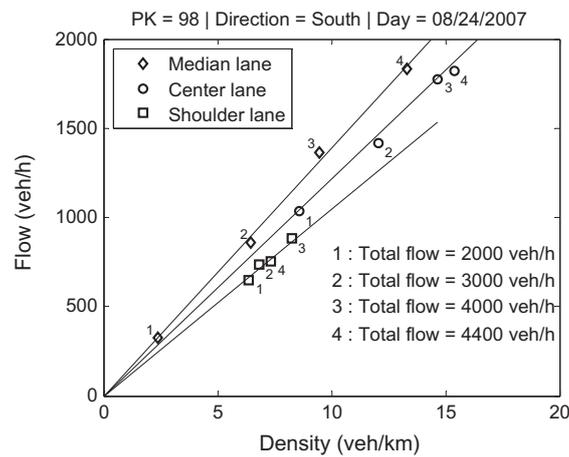


FIGURE 5.2 – Évolution voie par voie du diagramme fondamental en conditions fluides, observée sur l'A7 pour une montée en charge du trafic, sans RDV. Tiré de (Duret *et al.*, 2012)

début de cette partie, la VLA s'approche de la vitesse des véhicules lents. Le différentiel de vitesse est moins élevé, ce qui induit, lorsque le trafic monte en charge, une propension moindre des véhicules rapides à dépasser un véhicule lent circulant devant eux. La voie de droite est alors davantage utilisée, ce qui induit l'augmentation de l'offre de l'infrastructure. Cela a été mis en évidence au niveau macroscopique sur l'A7, lors de périodes où la VLA était abaissée à 110 km/h au lieu de 130 km/h, par l'observation de l'augmentation du débit critique sur la voie lente par rapport aux périodes où la régulation n'est pas activée, comme le montre la figure 5.3.

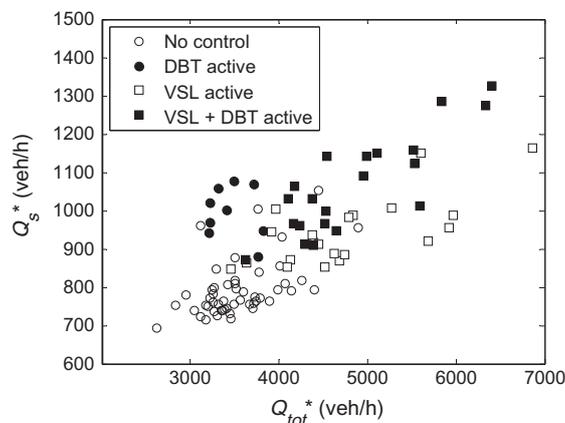


FIGURE 5.3 – Évolution de la capacité de la voie lente en fonction du débit total pour lequel elle est atteinte. Les cercles blancs correspondent à une situation sans régulation, les carrés blancs à une situation avec régulation. Tiré de (Duret *et al.*, 2012)

Ainsi, un AVLA permet *a priori* de maintenir, sur une autoroute interurbaine, des conditions fluides pendant une durée plus élevée. Cependant, pour maintenir cet avantage, la nouvelle VLA ne doit pas être trop basse, car bien que la répartition par voie s'uniformise avec la baisse de la VLA, l'offre de l'infrastructure reste constante en-dessous d'une certaine valeur (van den Hoogen et Smulders, 1994 ; Lee *et al.*, 2006 ; Soriguera *et al.*, 2017). En-dessous de cette vitesse critique, dont la valeur dépend de chaque terrain d'étude (Papageorgiou *et al.*, 2008), les bénéfices de l'augmentation de l'offre sont rattrapés par une hausse des temps de parcours à cause d'une vitesse trop faible. Cela explique, d'ailleurs, que des stratégies déployées *ad hoc* pour améliorer la sécurité en déployant, pour ce faire, de faibles VLA, aboutissent à une augmentation des temps de parcours et à une stabilisation, voire une

détérioration, du débit (Lee *et al.*, 2006 ; Washington State Department of Transportation, 2012 ; Lu et Shladover, 2014).

5.1.2.2 Filtrer le débit pour ne pas activer ou alimenter un goulot d'étranglement en aval

Un AVLA peut aussi être déployé en amont d'une restriction de capacité dans le but de garantir un trafic fluide au droit de cette restriction (Lin *et al.*, 2004 ; Popov *et al.*, 2008 ; Carlson *et al.*, 2011). L'objectif est donc là aussi de retarder l'apparition de la congestion.

L'idée générale est, par l'AVLA, de limiter le débit qui s'écoule vers la restriction. La nouvelle VLA est alors choisie de sorte que ce débit soit égal à l'offre théorique de cette restriction. En effet, l'arrivée d'un débit trop important peut sinon, suivant la typologie du goulot d'étranglement, engendrer une chute de capacité empêchant d'utiliser pleinement son offre. Ainsi, cette stratégie de filtre du débit permet là aussi d'augmenter le débit de l'infrastructure et d'abaisser les temps de parcours, ce qui a été vérifié sur le terrain et en simulation pour plusieurs configurations de restrictions de capacité, notamment les réductions du nombre de voies (Lin *et al.*, 2004) ou les convergents (Carlson *et al.*, 2010).

Dans le cas d'une congestion déjà installée en aval, des stratégies proactives comme celle portée par l'algorithme SPECIALIST (Hegyi *et al.*, 2008 ; Hegyi et Hoogendoorn, 2010) vont plus loin que le simple filtre du débit, en détectant puis éliminant les ondes de surcongestion par l'application d'un plan spatial et temporel de vitesses.

De manière analogue aux stratégies visant à homogénéiser le trafic, il faut veiller à ce que la VLA appliquée ne soit pas trop faible. Il ne faut pas non plus qu'elle soit appliquée pour une longue période, engendrant sinon en amont des temps de parcours plus longs qui ne compensent pas le gain de temps obtenu par l'application de conditions fluides au droit de la restriction de capacité (Soriguera *et al.*, 2017).

5.1.3 Impacts sur la sécurité routière

5.1.3.1 De la difficulté à quantifier l'insécurité routière

L'amélioration de la sécurité routière sur VSA vise deux objectifs (Buisson, 2014) :

- diminuer le risque d'accidents, qui sont causés par les collisions entre véhicules ;
- diminuer la gravité de ces accidents, qui peuvent être catégorisés suivant :
 - les simples accrochages ;
 - et les accidents corporels :
 - impliquant des blessés légers ;
 - impliquant des blessés graves ;
 - impliquant des tués.

Pour quantifier ces diminutions, une démarche naturelle consiste à récolter, sur une VSA donnée, chaque événement d'accident avec la gravité associée (Martin, 2002). Elle n'est cependant pas la plus pratique à mettre en œuvre. D'une part, les accidents étant somme toute peu fréquents, l'étude de ces accidents doit se faire sur une période de temps assez longue. Le recueil doit alors être effectué avec précision (position et temps de l'accident, conditions de trafic au moment de l'accident, ...) (Golob et Recker, 2004) et se faire sur le long terme, ce qui, pour certains terrains, est parfois difficile à réaliser (Buisson, 2014). D'autre part, dans le cas de l'utilisation de la simulation ou de méthodes analytiques pour évaluer un projet routier, cette estimation du nombre d'accidents et de leur fréquence s'avère impossible. Les modèles utilisés supposent en effet que les véhicules respectent les distances de sécurité, ce qui implique qu'il n'y a pas d'accidents. Dans ces deux situations, l'utilisation d'indicateurs de substitution, qui s'appuient sur des tendances relevées sur le terrain entre

les conditions de trafic et les accidents, semble alors nécessaire pour tenter de quantifier l'insécurité routière (Mahmud *et al.*, 2019).

Ces indicateurs de substitution s'appuient généralement sur :

- la vitesse pratiquée. En conditions fluides, le risque d'accidents graves augmente proportionnellement au carré de la vitesse, ce qui est à mettre en relation avec l'énergie cinétique liée à l'éventuelle collision (Nilsson, 2004 ; Viallon et Laumon, 2013). La vitesse pratiquée ne peut cependant pas expliquer la fréquence des accidents et des accrochages (Hauer, 2009);
- le nombre de kilomètres parcourus, leur augmentation rendant plus probable l'exposition à un accident (Buisson, 2014);
- le nombre de changements de voie, leur exécution pouvant aboutir à un risque d'accrochages plus élevé (Pande et Abdel-Aty, 2006);
- le nombre de transitions entre un état fluide et un état congestionné, une mauvaise gestion des véhicules de leur décélération pouvant aboutir à un accrochage (Golob et Recker, 2004 ; Hegyi *et al.*, 2005);
- l'hétérogénéité des vitesses, capturée par la variance des vitesses (Lin *et al.*, 2004). Une grande hétérogénéité induit des vitesses pratiquées très variables d'un véhicule à l'autre, ce qui peut augmenter la propension à changer de voie ou à devoir décélérer.

5.1.3.2 Effets observés d'un AVLA sur la fréquence des accidents et effets possiblement atteignables

Lorsque des données recensant le nombre d'accidents *in situ* et leur gravité sont disponibles, on remarque qu'un AVLA induit une baisse de ces occurrences ainsi qu'une diminution du nombre de blessés graves, et ce, qu'il soit statique ou dynamique. Ainsi, sur l'autoroute M25, près de Londres, l'introduction d'une stratégie de RDV a réduit la fréquence des accidents impliquant des blessés de 20 % (Highways Agency, 2007). En Espagne, sur les autoroutes périphériques de Barcelone, une comparaison entre la situation entre 2006 et 2007 où la VLA était de 120 km/h et la situation entre 2008 et 2011 où elle était de 80 km/h, a été réalisée (Soriguera *et al.*, 2013). Avec un tel AVLA, le nombre, rapporté aux kilomètres parcourus, de blessés légers a augmenté de 14 %, mais celui du nombre de blessés graves a été réduit d'un quart, et celui des tués de moitié.

Il arrive que de telles données ne soient pas disponibles, notamment dans le cas des études en simulation préalables au déploiement d'un projet. Certains auteurs utilisent alors, à partir de données d'accidents relevées précédemment sur le terrain étudié, des modèles de prédiction des accidents, qu'ils appliquent ensuite aux données simulées de sortie. C'est notamment le cas de Lee *et al.* (2006), qui élaborent un taux potentiel d'accidents calculé à partir d'indicateurs obtenus depuis la vitesse et le débit en amont et en aval de la zone contrôlée par un AVLA, visant à quantifier le comportement du changement de voie ainsi que les variations spatiale et temporelle de la vitesse. La gravité des accidents n'est pas abordée. Pour les stratégies d'AVLA testées dans cet article – abaissement statique d'une part, et abaissement dynamique de sorte que la VLA soit la moyenne entre la vitesse en amont et celle en aval d'autre part –, le taux potentiel moyen calculé diminue par rapport à une situation sans AVLA.

Enfin, terminons par un résultat pouvant être pris comme une remarque de bon sens. Par le fait de l'homogénéisation des vitesses permise par un AVLA, la variance de la vitesse de flot sur l'ensemble des voies est en baisse, en conditions fluides, par rapport à une situation sans AVLA (van den Hoogen et Smulders, 1994 ; Lin *et al.*, 2004 ; Highways Agency, 2007 ; Punzo *et al.*, 2012) : une telle stratégie peut donc participer à la réduction de la gravité des accidents.

5.1.4 Impacts sur la qualité de l'air

5.1.4.1 Mesurer les émissions polluantes des véhicules

Comme on l'a notamment vu dans la partie 1.1.1.2, le trafic autoroutier est source d'émissions polluantes, principalement liées à l'échappement. Pour quantifier l'impact du trafic sur la qualité de l'air, l'objectif est alors de mesurer ces émissions à l'échappement de manière globale, c'est-à-dire à l'échelle de l'infrastructure étudiée et de la période de temps considérée. Une autre piste aurait pu être d'utiliser des capteurs en bord de route mesurant la concentration en polluants, mais ils ne permettent pas de distinguer précisément la source des polluants ambiants, ni de quantifier leur production. En effet, les émissions hors échappement et celles issues de l'échappement sont amalgamées et se propagent dans l'air. Puisqu'il est coûteux, et quasiment insurmontable à l'heure actuelle en termes de récupération de données, de placer des capteurs donnant les différentes émissions de polluants d'un véhicule donné, une solution est d'utiliser un modèle de facteurs d'émissions (Franco *et al.*, 2013). Ces derniers donnent les émissions par unité de longueur et dépendent du polluant ainsi que de la vitesse du véhicule. Ils dépendent aussi de sa catégorie, un véhicule hybride récent, par exemple, émettant moins par unité de longueur qu'un véhicule à essence relativement ancien. Ils peuvent être obtenus en laboratoire, à partir de méthodes au banc à rouleaux.

On peut distinguer deux méthodes de calcul des émissions :

- les premières, comme PHEM (Zallinger et Le Anh, 2005), s'attachent à l'échelle microscopique, en effectuant le calcul à partir des caractéristiques individuelles d'un véhicule, notamment sa vitesse et son accélération instantanées;
- les deuxièmes, comme COPERT (Ntziachristos *et al.*, 2009), s'attachent à une échelle davantage agrégée, dans la mesure où elles considèrent uniquement la distance totale parcourue par le véhicule ainsi que sa vitesse moyenne pendant son parcours.

Quelle que soit la méthode utilisée, il est alors possible d'utiliser des données récoltées *in situ* ou en sortie d'une simulation pour en déduire une estimation des émissions de polluants (Jayol *et al.*, 2022).

5.1.4.2 Effets d'un AVLA sur les émissions polluantes

Pour les polluants réglementés évoqués dans la partie 5.1.4.1, les courbes des facteurs d'émission en tenant compte de la vitesse moyenne ont une forme en U, c'est-à-dire que les émissions par unité de distance sont élevées pour de basses et de hautes vitesses moyennes pratiquées. On peut le constater, pour le CO et les NO_x, sur la figure 5.4, qui présente l'évolution de leurs facteurs d'émissions en fonction de la vitesse moyenne pour plusieurs classes de véhicules, à partir de la méthode COPERT. On peut remarquer qu'un plateau est atteint pour des vitesses comprises entre 40 et 100 km/h. Ainsi, en première approximation et à distances parcourues égales, si la vitesse moyenne pratiquée avant l'AVLA induit un positionnement sur la partie croissante de la courbe et que la vitesse moyenne pratiquée pendant l'AVLA induit un positionnement sur le plateau, on peut s'attendre à ce qu'une telle stratégie de régulation contribue à la diminution des émissions du polluant considéré.

Ce résultat est en cohérence avec le peu d'études qui évaluent l'aspect environnemental des stratégies d'AVLA. Le cas londonien (Highways Agency, 2007) assure bien que les émissions sont globalement réduites de 2 à 8 % suivant le polluant considéré, mais sans fournir plus de précisions quant à leur type, ni à la méthodologie retenue pour ce calcul. Le cas napolitain (Punzo *et al.*, 2012) utilise la méthodologie de COPERT, appliquée aux vitesses de flot récoltées sur des boucles électromagnétiques placées le long du réseau autoroutier. Les facteurs d'émission utilisés sont calculés en fonction de la composition du parc de la

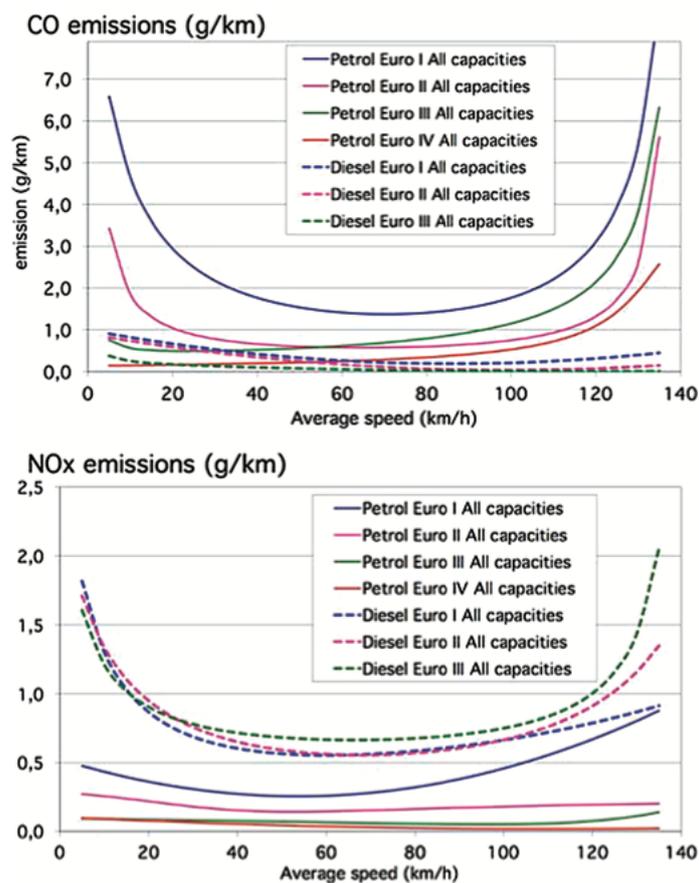


FIGURE 5.4 – Facteurs d'émissions à l'échappement en fonction de la vitesse moyenne pratiquée pour le CO et les NO_x, estimés à partir de la méthode COPERT. Tiré de (André et Brutti-Mairesse, 2015)

région napolitaine. Les émissions sont comparées, pour le CO, les NO_x, les PM10 et le CO₂, entre une semaine en février 2009 où la VLA était de 90 km/h et une semaine en avril 2009 où la VLA était de 80 km/h. Les résultats moyennés à l'échelle de la semaine montrent une diminution des émissions respectivement de 10 % pour le CO et de l'ordre de 3 % pour les trois autres polluants. Enfin, pour le cas barcelonais (Soriguera *et al.*, 2013), les auteurs calculent, pour le CO₂, les NO_x et les PM10, l'excédent des émissions en 2010 avec une stratégie de RDV réactive activée par rapport à la situation, en 2007, où cette stratégie n'était pas activée. La méthodologie est la même que pour le cas napolitain, le parc considéré étant évidemment celui de la périphérie de Barcelone. Cette fois, les externalités sont converties monétairement. Les résultats montrent une très faible hausse de ces externalités en périodes de congestion, inférieure à 2 %, mais une baisse de l'ordre de 3 à 6 % en périodes de trafic fluide.

5.1.5 Bilan de l'étude bibliographique et directions induites pour la méthode d'évaluation

L'étude de la littérature indique donc que l'AVLA, qu'il soit statique ou dynamique, permet d'atteindre les effets suivants :

- au niveau des conditions de circulation : une baisse des temps de parcours si la VLA appliquée n'est pas trop restrictive, de par l'homogénéisation de l'utilisation des voies en conditions fluides ou du filtre de débit en amont d'une restriction de capacité;
- au niveau de la sécurité routière : une baisse du nombre d'accidents graves et une

potentielle baisse de la fréquence des accidents de manière générale. Cela s'évalue, au vu de la rareté des accidents de la route, sur une longue échelle de temps ;

- au niveau des émissions de polluants : une baisse globale, au moins en conditions fluides, des émissions si la VLA initiale est élevée et la nouvelle VLA supérieure à 30 km/h.

Mettons ce bilan en perspective de l'évaluation qui sera proposée dans la partie 5.2, le couplage entre l'AVLA et le déploiement d'une VR2+ étant au cœur des enjeux de la construction de cette évaluation :

- au niveau de la sécurité routière, il est impossible de réaliser une étude cohérente à l'échelle temporelle du court terme et en utilisant les outils actuels de la théorie du trafic. La seule étude réalisable est de comparer les vitesses moyennes des VG et de la VR2+ pendant les périodes de congestion. L'AVLA s'accompagnant d'une diminution du différentiel de vitesses moyennes entre ces deux types de voie, on s'attend donc à une potentielle baisse des risques d'accidents liés aux changements de voie des VOM pour rejoindre la VR2+ ou bien pour en sortir, ainsi que de leur gravité. Cette étude n'aboutirait finalement qu'à reproduire et confirmer un constat déjà connu ;
- au niveau de la qualité de l'air, les VLA initiales pratiquées étant de 90 ou 110 km/h, un AVLA à 50 ou 70 km/h aboutit à des émissions *a priori* inférieures ou égales. Ce résultat mène à la conclusion que pour éviter d'aboutir à une tautologie, l'évaluation des émissions de polluants n'est pas une composante principale de la méthode que l'on va proposer.

Ainsi, la méthode d'évaluation proposée s'axera sur les impacts au niveau des conditions de circulation. Elle permettra de vérifier :

- d'une part, si l'AVLA couplé au déploiement d'une VR2+ permet effectivement une amélioration de ces conditions si le seuil de VLA choisi n'est pas trop faible, ce qui peut être intéressant si on veut savoir si on ne pénalise pas trop les VI ;
- d'autre part, si ces conditions de circulation profitent davantage aux VOM qu'aux VI, ce qui est au cœur des enjeux de la thèse.

5.2 Principes et développement de la méthode d'évaluation proposée

5.2.1 Fondements d'une évaluation générique : la performance mesurée au prisme tactique

La méthode proposée ici consiste en l'évaluation de la performance tactique d'un projet de VR2+. À l'échelle temporelle d'une période de pointe, elle s'attache donc à quantifier les impacts sur les conditions de circulation expérimentées par les VOM et VI. En effet, comme on l'a vu dans le chapitre 1, la garantie d'un temps de parcours compétitif pour les VOM est le seul incitatif, à cette échelle, permettant d'évaluer la performance relative à l'enclenchement d'un report modal, qui est l'objectif stratégique visé par ce déploiement. Ce report modal, alimenté par l'évolution des comportements des usagers quant à leur utilisation de la voiture, ne pourra donc être évalué qu'à plus long terme.

La visée de cette démarche est générique. Les protocoles d'évaluation *a priori* produits jusqu'ici en France, bien qu'ils distinguent les modalités d'activation statiques (de [Wissocq et al., 2021b](#)) des modalités dynamiques ([Hans et Damas, 2019](#) ; [Rousic et al., 2020](#)), n'ont pas pour objectif d'étudier l'influence de ces modalités sur les conditions de trafic, mais seulement d'accompagner les exploitants dans l'application d'une modalité particulière

sur leur terrain. De même, l'impact de la VLA sur les performances de la VR2+ n'y est pas évoqué. En corollaire, comme en faisait état le tableau 1.1 lié aux entretiens menés avec des exploitants, une variabilité de configurations fleurit sur les autoroutes urbaines nationales, chaque configuration étant censée garantir la meilleure performance pour son terrain.

Les retours d'expérience rendent ainsi compte de cette variabilité (Duffy, 2021 ; Delcampe, 2022 ; Adeus, 2023), et leur agrégation peut donner une indication générale de la performance des VR2+ françaises. Par conséquent, en complément de ces protocoles d'évaluation et de ces retours d'expérience, on cherche à étudier l'influence des spécificités opérationnelles françaises que sont la modalité d'activation de la VR2+ et la valeur de la VLA, à la manière d'un *benchmark*. On fait le choix d'y inclure aussi la proportion en VOM projetée au moment où la VR2+ est déployée, dont on a vu qu'elle impactait les conditions de trafic. Finalement, la généralité de cette évaluation se retrouve dans la multiplicité des configurations présentées et étudiées, permettant d'avoir une vision exhaustive des problématiques opérationnelles liées au déploiement des VR2+. Elles ambitionnent ainsi à servir, modestement, d'outil d'aide à la décision quant au déploiement d'une VR2+ et sur les réflexions liées à la feuille de route relative au développement du covoiturage qui sera définie d'ici fin 2024.

5.2.2 Les trois dimensions de l'évaluation

5.2.2.1 La VLA : une dimension opérationnelle réglementaire

La première composante opérationnelle de l'évaluation est la dimension réglementaire. Elle se traduit par le seuil de la VLA au moment où la VR2+ est activée. Les VLA considérées vont de la VLA nominale d'avant-projet, égale à 90 ou 110 km/h suivant le terrain considéré, jusqu'à 50 km/h, valeur correspondant au seuil recommandé pour le déploiement des VR2+.

Dans le cas de la conservation de la VLA nominale, il n'y a évidemment pas d'AVLA. Lorsqu'un AVLA est nécessaire, l'algorithme \mathcal{A} est utilisé. On introduit alors la notion de procédure d'activation pour évoquer l'enclenchement de la stratégie d'AVLA suivie de l'activation de la VR2+. De même, la procédure de désactivation désigne le retour à la VLA nominale conjoint à la désactivation de la VR2+, actions qui sont simultanées du fait que l'IISR ne préconise pas de relèvement progressif de la VLA. Ces notions sont illustrées par la figure 5.5, qui permet de mieux comprendre le couplage entre AVLA et (dés)activation de la VR2+.



FIGURE 5.5 – Illustration d'une procédure d'activation et de désactivation pour le cas d'une VLA nominale de 110 km/h et d'un AVLA à 50 km/h

5.2.2.2 La modalité d'activation et de désactivation : une dimension opérationnelle de gestion

L'autre composante opérationnelle de l'évaluation est la dimension de gestion. Elle est traduite par la modalité d'activation et de désactivation de la VR2+. L'analyse du contexte opérationnel français effectuée dans le chapitre 1 incite à considérer les trois modalités suivantes :

- la *modalité statique permanente* (MSPe), la VR2+ étant activée en permanence, en particulier pendant la totalité de la période de pointe. Les procédures d'activation et de désactivation n'ont donc pas de sens ici;
- la *modalité statique prédéterminée* (MSPr), la VR2+ étant activée en permanence sur une période de temps incluse dans la période de pointe. Cette considération est motivée par le fait que la période congestionnée ne correspond pas à la totalité de la période de pointe. Une activation permanente, y compris donc en périodes de trafic fluide, pourrait alors paraître trop rigide et moins entendable pour les usagers. Ainsi, l'heure de début (resp. de fin) de la période de temps retenue correspond à celle observée de début (resp. de fin) de la congestion en situation d'avant-projet;
- la *modalité adaptative proactive* (MAP), la VR2+ n'étant activée qu'en cas de congestion. Elle se distingue donc, pour les usagers, en apparence par sa souplesse. Cette modalité est dite proactive en ce que le seuil opérationnel d'activation (resp. de désactivation) retenu vise à anticiper l'épisode de début (resp. de fin) de congestion. Le protocole opérationnel proposé, adapté à une congestion de demande, est le suivant :
 - la procédure d'activation est lancée lorsque le débit mesuré en amont de la VR2+ atteint le débit observé de la restriction de capacité aval;
 - la procédure de désactivation est lancée lorsque :
 - à la fois la vitesse mesurée en amont de la restriction de capacité aval est supérieure à 90 % de la VLA nominale, ce qui traduit un retour à des conditions fluides et donc une sous-alimentation de la restriction de la capacité aval;
 - à la fois le débit mesuré en amont de la VR2+ passe sous le seuil du débit observé, en situation d'avant-projet, après la congestion;
 - et à la fois :
 - soit la vitesse mesurée en amont de la VR2+ est supérieure à 90 % de la VLA nominale, ce qui traduit la baisse en charge de la demande;
 - soit la congestion est remontée jusqu'à l'entrée du réseau. Dans ce cas, l'aval est fluide tandis que la congestion est sévère : la VR2+ n'est alors plus utile et il vaut mieux la désactiver.

Pour des raisons pratiques et de compréhension du dispositif pour les usagers, il est souhaitable d'éviter des épisodes intempestifs d'activation puis de désactivation. On considérera alors qu'une fois désactivée, il n'est plus possible de réactiver la VR2+.

Il est à noter que des versions adaptatives plus « réactives », où la VR2+ est activée dès lors que la vitesse mesurée en aval est inférieure à la VLA, existent, comme ce qui a été élaboré à Grenoble. Elles sont réactives en ce que l'installation de la congestion précède l'activation de la VR2+. Elles n'ont pas été considérées pour des contraintes de temps. Pour les modalités statiques, l'étude de la MSPe et de la MSPr semblaient incontournables afin de déterminer si une activation permanente, malgré sa rigidité, est pertinente en termes de performance. Pour les modalités adaptatives, on a préféré axer les travaux sur une vision plus proactive. De plus, l'algorithme d'harmonisation utilisé ne serait pas adapté à une modalité réactive car il suppose que les conditions de trafic sont fluides.

5.2.2.3 La répartition modale initiale : une dimension de circulation

La répartition modale initiale correspond à la proportion en VOM dans le trafic projetée au moment où le projet de VR2+ devient réalité et qu'il est déployé. Cette proportion influence la répartition des flux de VOM et de VI, donc la dynamique de la congestion et les conditions de trafic, ce qui justifie l'étude de cette dimension. Afin de garantir l'utilité de la VR2+, les proportions de l'intervalle $]0 ; n_H/n]$ seront considérées.

Deux hypothèses sont posées relativement à l'étude de cette dimension :

- la demande en trafic reste la même qu'en situation d'avant-projet, afin d'effectivement évaluer la performance du système autoroutier d'avant-projet;
- la proportion en VOM reste constante au cours de la période de pointe.

En conséquence, l'étude de la proportion en covoitureurs parmi les passagers empruntant la VSA n'est pas une dimension de l'évaluation. Cette étude aurait en effet une visée davantage prospective, puisqu'un changement de la répartition de ces passagers, ainsi que de leur nombre, dans les véhicules disponibles entraîne un changement de la demande en trafic, donc aussi de la demande en VOM. Elle induit donc une vision au moins à moyen terme du déploiement de la VR2+. La visée générique prônée par la méthode d'évaluation, au contraire, est celle est la performance à court terme, donc celle du potentiel pour enclencher un tel changement dans la demande. Une telle vision à moyen terme sera abordée par le scénario applicatif présenté dans le chapitre 6.

5.2.2.4 La variabilité inter-quotidienne des conditions de trafic : entre profondeur de l'évaluation et définition des variables d'entrée du système à évaluer

De la présentation des trois dimensions précédentes, il ressort que chaque configuration résulte de la combinaison entre une modalité, une VLA et une proportion initiale en VOM. Ce sont alors les paramètres de l'évaluation. Une profondeur est ajoutée à chacune des configurations, liée à la variabilité inter-quotidienne des conditions de trafic. Ces dernières sont liées la demande et à l'offre en trafic sur le terrain considéré, qui sont les variables d'entrée du système à évaluer. Bien qu'une période de pointe se caractérise par un même phénomène, la congestion, cette demande et cette offre ne sont pas exactement les mêmes d'un jour à l'autre (Shao *et al.*, 2014 ; Wunderlich *et al.*, 2018). La demande peut par exemple être plus faible un jour donné qu'un autre. En conséquence, les conditions de trafic en période de pointe diffèrent aussi et présentent donc une variabilité inter-quotidienne. Cette dernière a un impact direct sur les indicateurs de performance (Hale *et al.*, 2016 ; Wunderlich *et al.*, 2018).

Ainsi, cette profondeur permet d'apprécier la performance d'une configuration sur plusieurs périodes de pointe, qui présentent chacun des spécificités différentes, ce qui apporte du réalisme à la démarche. Cela justifie d'ailleurs d'autant plus l'étude d'une modalité adaptative, visant à s'adapter aux conditions de trafic, donc en particulier à celles d'un jour donné. L'étude d'un unique jour, ou bien, lorsqu'on dispose des données relatives à plusieurs jours, d'un jour dit « moyen » censé moyenniser ces spécificités, n'est pas suffisant pour apprécier cette variabilité. Ainsi, chaque indicateur proposé est calculé comme un critère de position – ici, la moyenne – sera accompagné de son critère de dispersion – ici, l'écart-type –.

5.2.3 Quantifier la performance du système évalué

On définit ici les indicateurs de performance retenus dans le cadre de la méthode d'évaluation :

- l'allongement de la longueur maximale de remontée de congestion, par rapport à la situation d'avant-projet, a un intérêt *opérationnel de maîtrise de la congestion*. Cet indicateur est calculé à titre informatif, les problématiques de gestion de la propagation intéressant, on l'a vu dans le chapitre 1, les exploitants de VR2+;
- le retard moyen des VOM par rapport à celui des VI quantifie la *crédibilité* du système évalué, les VOM devant gagner du temps par rapport aux VI pour attester cette crédibilité;
- le retard moyen des VOM par rapport à celui en situation d'avant-projet quantifie la *pertinence* du système évalué, les VOM devant ne pas perdre de temps par rapport à la situation d'avant-projet pour attester cette pertinence. La situation où ils en perdent ne récompense pas, de fait, leur utilisation plus vertueuse de la voiture;
- dans le cas de la MAP, les heures d'activation et de désactivation de la VR2+ quantifient l'*effectivité* de cette modalité. D'une part, la plage d'activation de la VR2+, qui est alors dynamique, doit être cohérente avec la durée de la congestion. D'autre part, une VR2+ activée ou désactivée à des heures radicalement différentes d'un jour à l'autre, ou bien activée sur une période de temps trop courte, peut empêcher la fidélisation de néo-covoitureurs.

Pour résumer, un système performant au sens tactique doit, à nos yeux, assurer que :

- le retard moyen des VOM est inférieur à celui des VI;
- le retard moyen des VOM est inférieur ou égal au retard moyen des VOM en période d'avant-projet;
- le retard moyen des VI est supérieur ou égal au retard moyen des VI en période d'avant-projet.

5.2.4 Récapitulation

La figure 5.6 résume, sous forme de schéma bilan, la méthode développée dans ce chapitre.

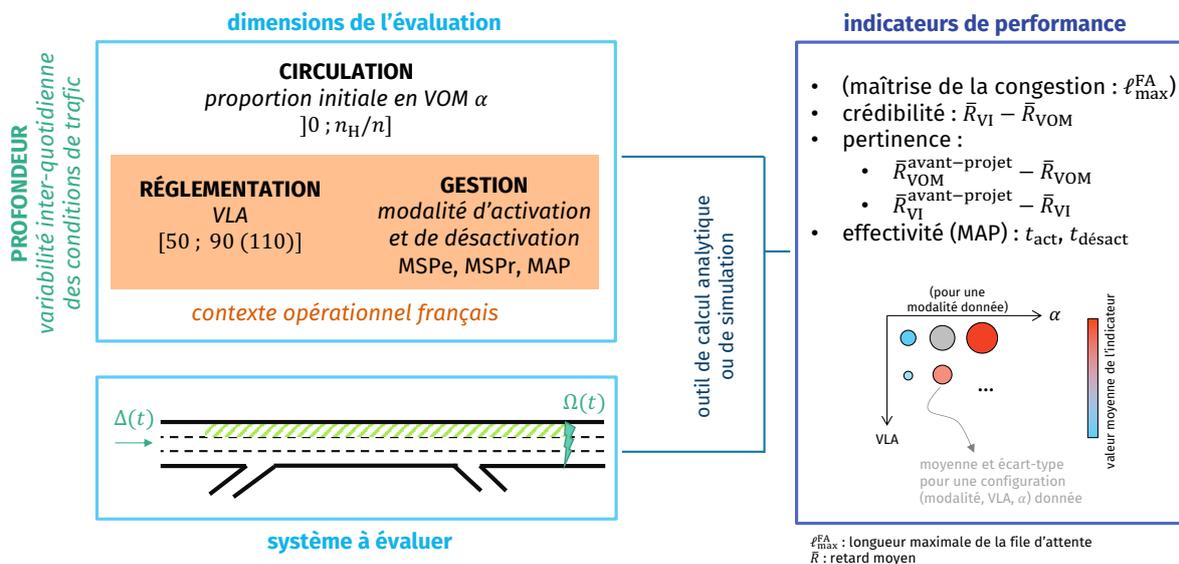


FIGURE 5.6 – Résumé graphique de la méthode générique d'évaluation proposée

Chapitre 6

Application de la méthode d'évaluation à un cas réaliste simulé

L'objectif de ce dernier chapitre est d'appliquer la méthode développée dans le chapitre précédent à une VSA française, sur laquelle un projet de déploiement de VR2+ est en réflexion, reproduite en simulation microscopique du trafic. Cette VSA est initialement limitée à 110 km/h, soit la valeur maximale pour ce type de voie. Cela permettra d'appliquer la méthode au cas opérationnel le plus restrictif en termes réglementaires, c'est-à-dire d'apprécier l'influence de l'ensemble du spectre des VLA jusqu'au seuil de 50 km/h. Dans le même temps, cette application de la méthode complète et généralise des premiers résultats exploratoires à propos de l'impact de l'AVLA sur les retards des usagers (Hans *et al.*, 2021).

La construction du modèle utilisé pour la simulation, ainsi donc que la présentation du terrain et des données utilisées, est faite dans la partie 6.1. Les résultats de l'évaluation sont présentés dans la partie 6.2. Ils sont accompagnés d'une étude annexe de prospection, visant à déterminer l'impact d'une augmentation du taux de covoitureurs sur la performance de la VR2+ étudiée dans ce chapitre.

La logique de la construction du modèle et de son application, qui sont le fil conducteur du chapitre, est résumée sur la figure 6.1.

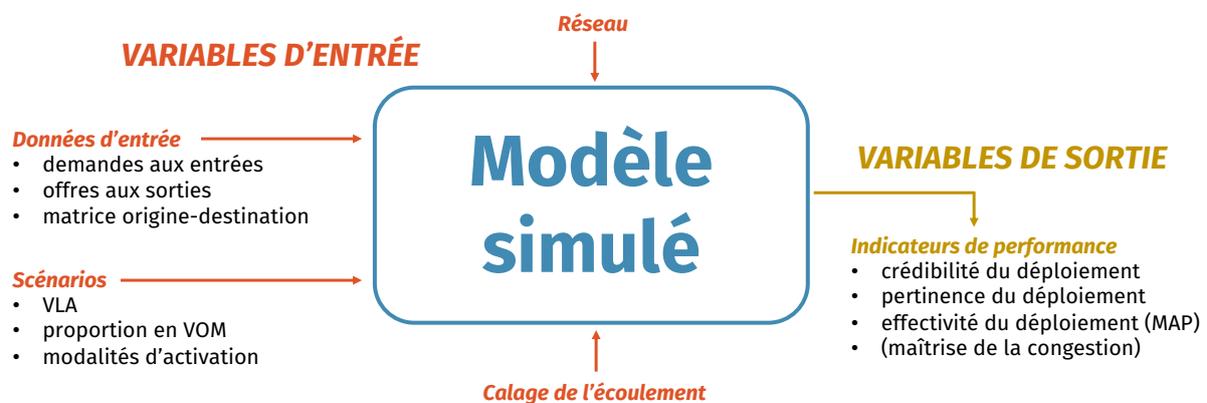


FIGURE 6.1 – Fil directeur du chapitre : de la construction du modèle à son application pour l'évaluation de la VR2+ ainsi simulée

6.1 Construction du modèle en simulation utilisé pour l'application de la méthode

6.1.1 Choix de l'outil de simulation dynamique et microscopique pour construire le modèle

Le modèle est construit en simulation dynamique microscopique à l'aide de la plateforme SymuVia, déjà utilisée tout au long de cette thèse. Plutôt qu'un modèle utilisant une résolution analytique, la simulation est préférée principalement pour faciliter le calcul des conditions de trafic. Il peut en effet être complexe du fait de la combinaison de celles induites par les différentes discontinuités sur le réseau. Par la même occasion, cette combinaison peut facilement être couplée aux variations de débit caractéristiques des périodes de pointe, le débit étant relevé toutes les six minutes.

L'utilisation d'une résolution microscopique au lieu d'une résolution macroscopique ou mésoscopique est motivée par deux points. D'une part, notre protocole d'évaluation se concentre sur l'étude agrégée des temps de parcours, et une telle résolution assure que les temps de parcours individuels sont calculés sans approximation. Une approximation classique, pour les autres modes de résolution, consisterait à récupérer le temps total perdu à partir du débit sur les différentes sections, en veillant, à partir de la proportion en VOM, à différencier le flux entre VOM et VI sur les sections où les deux types de véhicules à la fois sont autorisés à circuler. Une telle méthode ne permettrait pas, cependant, de tenir compte de l'effet des manœuvres de CVO au droit des bretelles intermédiaires. On ne peut pas encore affirmer, en conditions denses de trafic, que les VOM ne perdent pas de temps dans ces manœuvres. D'autre part, plus tôt dans cette thèse, l'utilisation de SymuVia a mis en évidence la capacité de cette plateforme à reproduire les chutes de capacité aux discontinuités autoroutières, notamment au droit des convergents – cf. figure 3.10(d) – et des interfaces amont des VR2+ pour le cas de trois voies sur la section courante – cf. figure 4.7(2)(b) –. De plus, cette plateforme est, au contraire d'Aimsun, disponible en code source ouvert, ce qui facilite une démarche de science ouverte.

Il est enfin très important de noter que le temps de parcours d'un véhicule est calculé comme la différence entre son temps de sortie et son temps de création dans la simulation, plutôt que celle entre son temps de sortie et son temps effectif d'entrée sur le réseau. Cette dernière définition est communément utilisée car elle s'intéresse uniquement au parcours sur la section concernée par la VR2+ (Duffy, 2021 ; Hans *et al.*, 2021). Cependant, il semble à nos yeux plus pertinent et crédible de tenir compte du temps d'attente à l'entrée du réseau, représenté donc par la différence entre le temps d'entrée et le temps de création. Cela permet d'estimer l'impact du déploiement sur les temps de parcours au-delà de cette seule section, ce qui est plus réaliste. On tient ainsi compte de l'extension de la file d'attente en amont de la zone simulée, ce qui est important lorsque les scénarios simulés amènent à des conditions très congestionnées.

6.1.2 Du terrain au synoptique

Le terrain étudié correspond à une partie de l'autoroute A7, au sud de Lyon, entre Saint-Fons et Ternay, dans le sens sud-nord, c'est-à-dire le plus utilisé en période de pointe du matin. Il est délimité, au sud, par le nœud de Ternay où se connectent trois autoroutes, et, au nord, par le boulevard urbain sud de Lyon. La tête de bouchon du terrain étudié est d'ailleurs liée à l'insertion des véhicules provenant de ce boulevard. Ce terrain est représenté sur la figure 6.2. Il présente trois voies sur la section courante, limitées à 110 km/h, ainsi que deux bretelles de sortie et deux bretelles d'entrée intermédiaires. Au niveau du codage de ce

réseau sur le simulateur, on constate, toujours sur la figure 6.2, des courbures localement faibles le long du linéaire. On se contentera alors d'un réseau simulé en ligne droite, avec des divergents et convergents ponctuels.

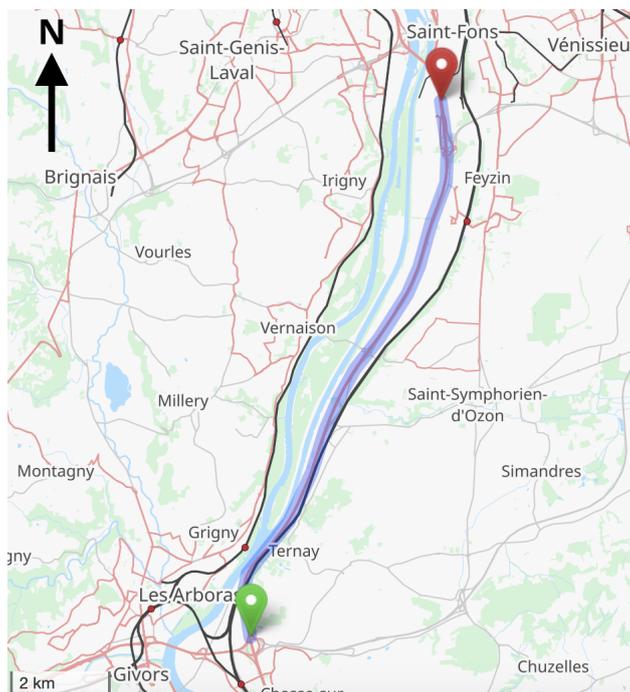


FIGURE 6.2 – Terrain d'étude pour ce chapitre : l'autoroute A7 entre Saint-Fons et Ternay; l'emprise de la partie étudiée est surlignée en bleu. Source : capture d'écran [openstreetmap.org](https://www.openstreetmap.org)

Sur ce réseau, l'opportunité d'un déploiement de VR2+ est étudiée depuis 2020, et son ouverture était prévue pour 2023 (Clairais, 2022). Des études de trafic *a priori* ont déjà été menées, en interne, afin notamment de déterminer la longueur d'emprise de la VR2+, mais aussi de tester l'impact de la VLA et de la proportion en VOM (Clairais *et al.*, 2020 ; Hans *et al.*, 2021). Une longueur fixe de 8 km a été retenue, ainsi qu'une modalité d'activation MSPr (cf. partie 5.2.2.2) entre 7h00 et 9h30. À partir de ces deux considérations, quatre scénarios d'activation ont été étudiés. Ils consistent en la combinaison d'une VLA et d'une proportion en VOM, le travail s'intéressant aux cas (70 km/h; 15 % de VOM), (70 km/h; 20 % de VOM), (70 km/h; 25 % de VOM) et (50 km/h; 25 % de VOM). Afin de modéliser l'écoulement du trafic, la simulation dynamique macroscopique de Hubsim, simulateur développé par l'entreprise Neovya et qui repose sur SymuVia, a été utilisée. Sur cette base, il a été montré que sur le réseau, les retards perdus augmentaient par rapport à la situation d'avant-projet, à la fois pour les VI, entre 65 et 95 %, et pour les VOM, entre 15 et 55 %. Toujours selon ces scénarios exploratoires, à VLA fixée, une augmentation de la proportion en VOM induit, quelle que soit la catégorie de véhicule, une baisse des retards totaux par rapport à la situation d'avant-projet. Enfin, à proportion en VOM fixée, une baisse de la VLA induit une augmentation de ces retards totaux. Ces résultats sont, par leur nature non générique, incomplets au regard de la démarche que l'on a proposé dans le chapitre précédent, mais permettent déjà d'avoir des premières indications.

Le synoptique de la section étudiée est présenté sur la figure 6.3. Les boucles électromagnétiques, permettant le recueil des conditions de trafic, y sont signalées par un rectangle annoté par leur nom. Il est à noter que la boucle L2, la plus en aval de la section courante, ne présente pas de conditions congestionnées. En effet, on a vu que la tête de bouchon était liée à l'insertion des véhicules venant du boulevard urbain sud. On précise maintenant que la

bretelle d'insertion associée se situe entre les boucles N2 et L2. Aussi, celle la plus en amont, la boucle V2, présente un défaut de sous-comptage des véhicules. En conséquence, ces deux boucles ne seront pas considérées. Cela amène alors à ne prendre en compte, pour le modèle qu'on construit ici, que le terrain encadré en bleu sur la figure 6.3. Ce terrain redimensionné est alors divisé en sept sections, divisions utilisées pour l'application de l'AVLA, indiquées par un cercle sur le synoptique. Il faut aussi retenir que les données de vitesse ne sont pas disponibles pour les capteurs N2, R6, R4 et S4.

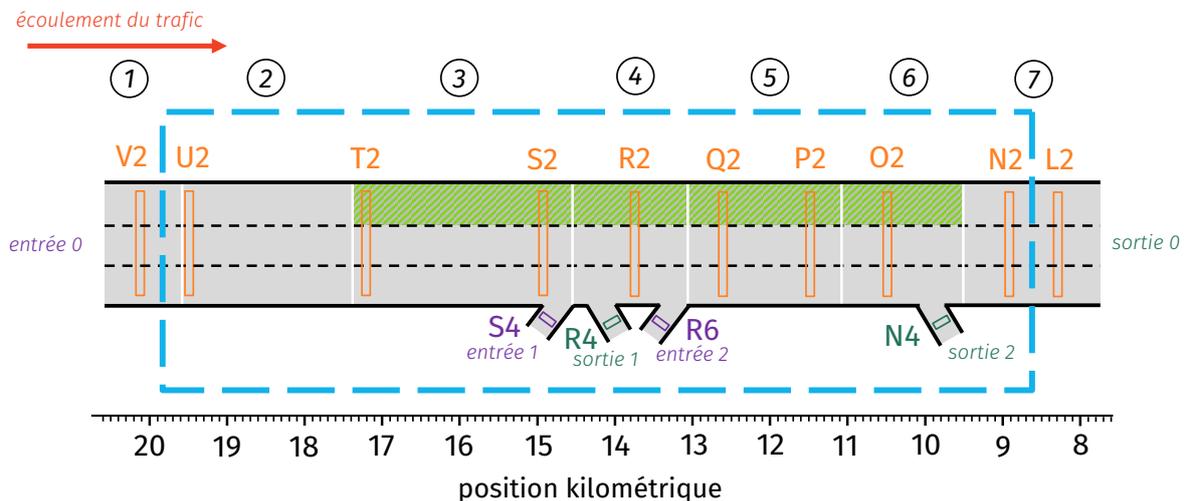


FIGURE 6.3 – Synoptique simplifié du terrain d'étude représenté sur la figure 6.2. L'emprise de la VR2+ est signalée en hachures vertes

6.1.3 Données disponibles et leur utilisation

Afin de construire le modèle, il faut savoir caractériser le trafic sur le terrain d'étude qui vient d'être présenté. Pour y parvenir, deux types de données relatives à ce terrain ont été gracieusement mises à disposition par la direction territoriale Centre-Est du Cerema :

- les premières sont relatives à une étude minéralogique. Elles rendent compte, par le relevé des plaques d'immatriculation, du nombre de véhicules, pour une entrée donnée, se dirigeant à une sortie donnée, ceci sur un périmètre plus large incluant le terrain d'étude;
- les secondes sont celles des boucles électromagnétiques dont la position sur le terrain a été introduite dans la partie précédente. Elles rendent compte des conditions de trafic sur le terrain étudié.

6.1.3.1 S'assurer d'une matrice origine-destination cohérente

Les données utilisées pour constituer la matrice origine-destination, s'appuient sur une enquête minéralogique menée par la Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Auvergne – Rhône-Alpes. L'enquête a été réalisée sur un périmètre plus large incluant le terrain d'étude, pendant la période de pointe du matin (6h00 – 10h00), et les données ont été redressées par Neovya. Réalisée pendant deux semaines du mois de mai 2019, elle consistait en un comptage des plaques d'immatriculation en seize points du périmètre élargi. En faisant l'hypothèse raisonnable que la matrice origine-destination en période de pointe ne change pas entre le printemps et l'automne de la même année, on couplera ces données à celles des boucles, présentées dans la partie suivante.

Les données redressées de l'enquête minéralogique sur le périmètre élargi permettent de disposer du débit de véhicules, pour chaque entrée, ayant pour destination une sortie donnée, ce que synthétise le tableau 6.1. Sur ce périmètre, ces entrées sont au nombre de onze et ces sorties au nombre de huit, ainsi que le montre la figure 6.4.

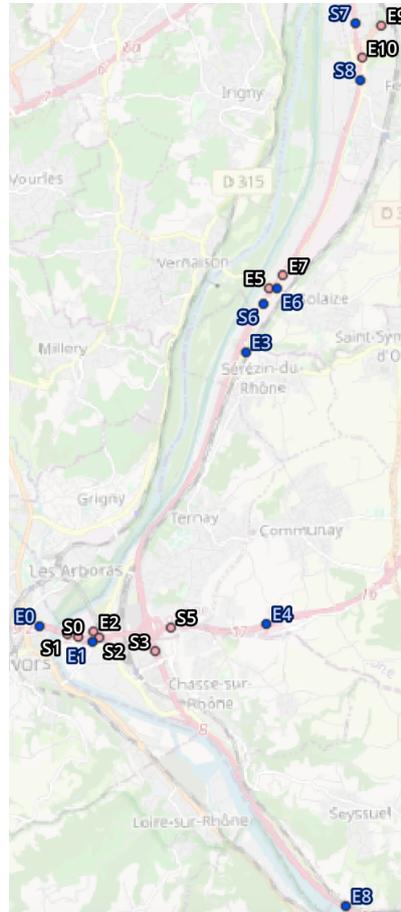


FIGURE 6.4 – Positionnement des entrées (préfixe E) et sorties (préfixe S) sur le périmètre élargi, à partir desquelles sont comptés les débits du tableau 6.1. Les points bleus correspondent aux entrées et sorties intéressantes pour le terrain d'étude

Pour adapter ces données au terrain d'étude, qui présente trois entrées et trois sorties, on élimine, à partir du tableau 6.1, les entrées et sorties superflues pour le terrain d'étude puis on agrège les valeurs restantes. On obtient alors, en divisant pour chaque entrée le nombre de véhicules se dirigeant à chaque destination par le nombre de véhicules cumulés, la matrice origine-destination du tableau 6.2.

Le recours à cette matrice est justifié par le fait que les données des boucles ne permettent pas de remonter à l'affectation des véhicules. Cependant, on peut utiliser ces données pour en partie valider les valeurs de cette matrice. En effet, la connaissance du nombre de véhicules cumulés en aval des deux branches de chacune des deux bretelles de sortie intermédiaires permet de connaître la proportion ξ de véhicules quittant le réseau à ces deux sorties, de sorte que $\xi = \frac{N_{\text{bretelle}}^{\text{aval}}}{N_{\text{bretelle}}^{\text{aval}} + N_{\text{section courante}}^{\text{aval}}}$. Cette situation est illustrée sur la figure 6.5.

Le tableau 6.3 montre alors que les valeurs de proportion dérivées de l'enquête minéralogique et celles obtenues à partir des données boucle sont similaires pour les deux sorties. Cela confirme la cohérence de la matrice origine-destination au moins pour l'écoulement des flux aux sorties du réseau étudié.

	S0	S1	S2	S3	S5	S6	S7	S8
E0	0	483,53	0	537,76	609,26	159,71	1056,71	148,5
E1	0	0	5,54	43,51	74,51	52,62	198,76	33,59
E2	411,13	0	0	0	0	0	0	0
E3	0	0	0	0	0,02	7,18	671,06	93,97
E4	534,82	0	61,36	655,2	0	0	0,01	0
E5	51,01	0	38,44	112,32	0	0	0	0
E6	0	0	0	0	0	0	479,22	189,8
E7	1126,71	0	178,87	1045,64	0,12	0	0	0
E8	638,97	0	66,29	0	1156,03	230,62	1820,83	196,73
E9	0	0	0	0	2,26	0	775,06	0
E10	0	0,05	0	0	0	0	760,35	0

TABLEAU 6.1 – Débits moyens (véh/h) entre chaque entrée (lignes) et chaque sortie (colonnes) indiquées dans la figure 6.4 et relatives au périmètre élargi, obtenus après le redressement des données issues de l'enquête minéralogique. Source : DREAL Auvergne – Rhône-Alpes, Neovya

	sortie 0	sortie 1	sortie 2
entrée 0	0,79	0,11	0,1
entrée 1	0,87	0,01	0,12
entrée 2	0,72	0	0,28

TABLEAU 6.2 – Matrice origine-destination obtenue à partir des résultats redressés de l'enquête minéralogique et restreints au terrain d'étude

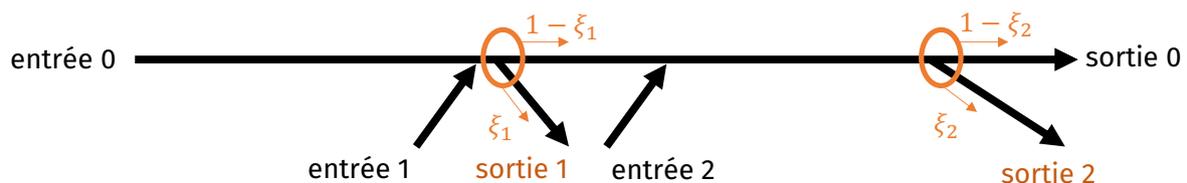


FIGURE 6.5 – Localisation des deux sorties intermédiaires sur le terrain d'étude, à partir desquelles la cohérence de la matrice origine-destination est vérifiée

	à partir de l'enquête minéralogique	à partir des données boucle
ξ_1	0,09	0,08
ξ_2	0,13	0,12

TABLEAU 6.3 – Comparaison des proportions des véhicules sortant du réseau aux deux sorties, en période de pointe du matin. Les valeurs obtenues à partir des données boucle sont une moyenne pour les neuf jours retenus pour le calage

6.1.3.2 Caractériser l'écoulement du trafic

Les données des boucles électromagnétiques donnent, pour une période d'agrégation de six minutes, la vitesse de flot, le taux d'occupation et le nombre de véhicules cumulés

de quatorze boucles électromagnétiques situées le long du terrain d'étude. Dix d'entre elles sont situées sur la section courante, tandis que les quatre autres sont situées sur les bretelles intermédiaires. Les données ont été relevées, tous les jours et à toute heure, entre le 16 septembre 2019 et le 20 octobre 2019 par la DIR Centre-Est. Ce nombre important de jours à disposition permettra de mener à bien l'étude de la variabilité inter-quotidienne des conditions de trafic ;

Une hypothèse doit être posée quant à l'utilisation de ces données de trafic. En effet, elles différencient le flux des véhicules légers de celui des poids lourds. L'étude des données montre que le flux de ces poids lourds, en période de pointe, représente environ 5 % du trafic total. Ce taux est faible, mais surtout constant pendant cette période. On assimilera alors les poids lourds à des véhicules légers.

La figure 6.6 permet de quantifier la congestion aux entrées ainsi qu'à la sortie principale du réseau. Elle montre une montée en charge aux entrées, notamment l'entrée 0 d'où provient la majorité des véhicules, entre 6h00 et 7h00. Dans le même temps, le débit de la sortie principale monte en charge avant de présenter un plateau qui coïncide, comme l'indique l'évolution des valeurs de taux d'occupation, avec des conditions congestionnées. Ce plateau perdure jusqu'aux alentours de 8h45, le débit décroissant alors dans le sillage de la diminution, déjà amorcée, du débit aux entrées du réseau. C'est donc une congestion de demande qui caractérise le réseau étudié.

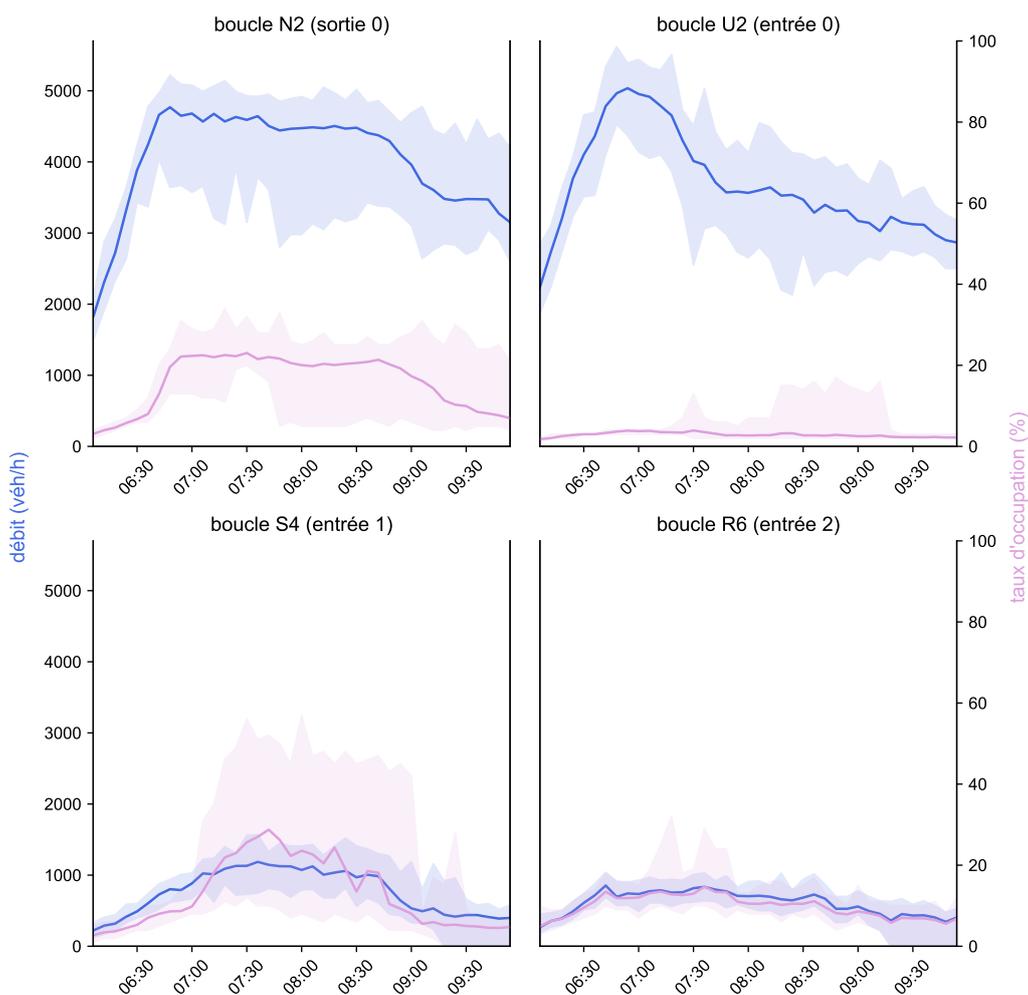


FIGURE 6.6 – Chroniques des enveloppes et de la moyenne (en traits pleins), sur les 25 jours de semaine, du débit et du taux d'occupation en période de pointe pour la sortie principale et les entrées du réseau étudié

Enfin, précisons la manière dont les débits aux entrées et aux sorties du réseau sont traités par le simulateur. Les débits aux entrées correspondent exactement à ceux indiqués par les boucles et sont donc mis à jour toutes les six minutes. La même démarche est utilisée pour imposer le débit aux sorties, à la seule différence que ce débit est imposé uniquement si les valeurs de taux d'occupation des boucles indiquent qu'il y a congestion.

6.1.3.3 Choix des jours retenus et définition des offres en aval

À partir des données boucle analysées dans la sous-partie précédente, on retient les jours à utiliser pour définir les scénarios de déploiement de la VR2+. Plus précisément, il s'agit de déterminer les variables d'entrée, pour chaque jour, que sont les demandes et les offres.

D'abord, dans le contexte des mobilités du quotidien, seuls les jours de semaine seront considérés, ce qui laisse 25 jours à disposition. Ensuite, les jours présentant une congestion de durée ou de longueur exceptionnellement étendue, donc non représentative des conditions usuelles, sont écartés. Enfin, le jour présentant une panne des boucles est écarté. Le tableau 6.4 synthétise le choix des 19 jours retenus. Il précise par ailleurs les jours retenus lorsqu'il s'agira de caler les paramètres liés à l'écoulement du trafic, démarche indépendante de celle exposée dans cette partie, et qui sera expliquée dans la partie 6.1.5.1. La lecture du tableau montre aussi que parmi les jours retenus pour les scénarios, cinq jours d'entre eux seront encore écartés, suivant la méthode de détermination de l'offre aux sorties, qu'on va maintenant exposer.

En effet, les débits imposés aux sorties, donc les offres, doivent être redimensionnés. En effet, comme en rendait compte la figure 6.6 dans la sous-partie précédente, l'offre de la sortie principale est, en moyenne, relativement constante en période de pointe. C'est donc principalement la variabilité quotidienne de la demande qui contribue à celle des épisodes de congestion. On prend donc la décision d'imposer une offre constante au niveau de la sortie 0 à partir du moment où la congestion débute. De plus, continuer d'imposer cette offre après la fin théorique de la congestion permet d'éviter un débit de relâchement trop élevé au droit de la sortie. En réalité, le passage entre les conditions congestionnées et fluides est progressif. Cette hypothèse est d'ailleurs compatible avec le cas d'une congestion de demande où le débit d'entrée, alors inférieur à cette offre, s'écoule librement après la fin de la période congestionnée.

La même logique est appliquée aux sorties 1 et 2. Cependant, au vu du faible nombre de périodes congestionnées par rapport à la sortie principale, il est décidé de ne pas y imposer de limitation du débit de sortie en congestion.

Pour déterminer l'offre moyenne en sortie 0, la figure 6.7 présente la répartition journalière de l'offre moyenne en périodes congestionnées. Toujours dans cette logique d'avoir une valeur imposée constante, on écarte les quatre jours présentant les moyennes les plus basses et le jour présentant la moyenne la plus élevée. Cette démarche est pertinente puisqu'elle permet d'abaisser l'écart-type de la distribution des offres de 153 à 65 véh/h. Ces jours correspondent aux 25 et 27 septembre et les 3, 9 et 17 octobre. La moyenne du débit sur les périodes congestionnées retenues, qui celle sera imposée dans les simulations, est alors de 4523 véh/h.

6.1.4 Scénarios considérés au regard de la méthode d'évaluation

On présente comment sont construits les scénarios de déploiement de la VR2+ à partir du protocole d'évaluation du chapitre 5. Cette construction s'adapte aux particularités du terrain d'étude et à l'utilisation de la simulation.

Jour		Observations au niveau du trafic	Observations au niveau du fonctionnement des boucles	Retenu pour les scénarios?	Retenu pour le calage?
lundi	16/09/2019	congestion au niveau de la boucle U2 (entrée 0) de 7h30 à 8h15; congestion non terminée au niveau de la boucle N2 (sortie 0) à 10h00		non	non
mardi	17/09/2019	fluctuations récurrentes de la vitesse sur la section courante		oui	non
mercredi	18/09/2019			oui	oui
jeudi	19/09/2019	fluctuations récurrentes de la vitesse sur la section courante		oui	non
vendredi	20/09/2019			oui	oui
lundi	23/09/2019	congestion au niveau de l'entrée 0 (boucle U2) de 7h20 à 8h00		oui	non
mardi	24/09/2019		panne de toutes les boucles pendant une période de 6 minutes autour de 8h00, reprise ensuite	non	non
mercredi	25/09/2019	congestion au niveau de la boucle N4 (sortie 2) de 6h45 à 8h15, sans incidence sur le reste du réseau		oui	non
jeudi	26/09/2019	fluctuations récurrentes de la vitesse sur la section courante		oui	non
vendredi	27/09/2019			oui	oui
lundi	30/09/2019	très forte congestion au niveau de la boucle P2 de 8h45 à 10h00 qui se propage jusqu'à la boucle S2; 2 ^e épisode de congestion au niveau de la boucle N2 (sortie 0) après 9h30		non	non
mardi	1 ^{er} /10/2019			oui	oui
mercredi	2/10/2019			oui	oui
jeudi	3/10/2019		défaut de comptage de la boucle Q2 sur toute la période	oui	non
vendredi	4/10/2019			oui	oui
lundi	7/10/2019	très forte congestion au niveau de l'entrée 0 de 8h30 à 9h15		non	non
mardi	8/10/2019	fluctuations récurrentes de la vitesse sur la section courante		oui	non
mercredi	9/10/2019	fluctuations récurrentes de la vitesse sur la section courante		oui	non
jeudi	10/10/2019		panne des boucles O2, P2, R2, S2, T2 après 9h30	non	non
vendredi	11/10/2019			oui	oui
lundi	14/10/2019		défaut de comptage de la boucle Q2 sur toute la période	oui	non
mardi	15/10/2019	congestion permanente sur tout le réseau à partir de 6h30		non	non
mercredi	16/10/2019			oui	oui
jeudi	17/10/2019			oui	oui
vendredi	18/10/2019		défaut de comptage de la boucle Q2 sur toute la période	oui	non
<i>total</i>				19(14)	9

TABLEAU 6.4 – Caractéristiques des 25 jours de données à disposition amenant à leur choix, ou non, pour alimenter les scénarios ou le calage du modèle

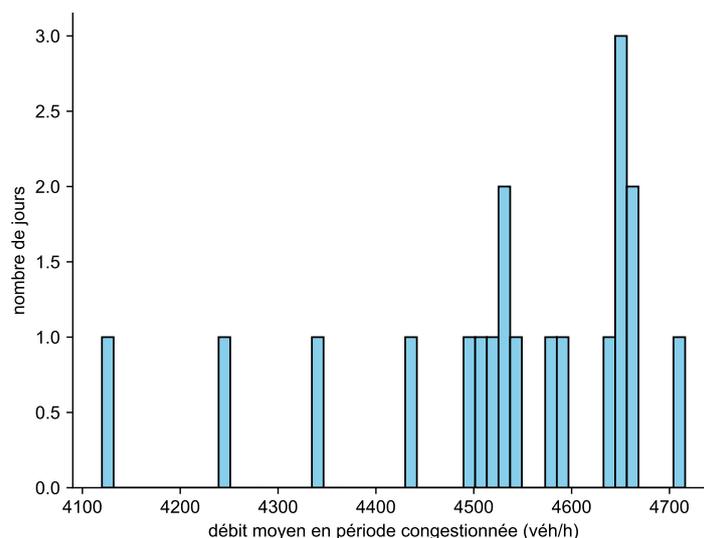


FIGURE 6.7 – Histogramme de la distribution journalière, pour les 19 jours retenus, de la moyenne du débit en sortie 0 en congestion

6.1.4.1 Considérations liées à l'utilisation de la simulation

La simulation ne permet pas d'étudier de façon continue l'ensemble des valeurs admissibles pour la proportion en VOM et pour la VLA. On se limitera donc :

- à l'ensemble {5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 33} % pour les proportions en VOM ;
- à l'ensemble {50 ; 70 ; 90 ; 110} km/h pour les VLA.

Deux dernières considérations sont faites. La première est, dans l'objectif de quantifier la remontée de congestion, la pose de boucles électromagnétiques virtuelles tous les 100 m sur l'ensemble de la section courante. Conformément aux principes exposés pour le calage, c'est une vitesse inférieure à 85 km/h qui permet de repérer la congestion. La deuxième considération est, afin de lisser les irrégularités, de répliquer dix fois chaque simulation d'une combinaison entre une modalité, une VLA, une proportion en VOM et un jour.

6.1.4.2 Construction des modalités d'activation et de désactivation

Il faut aussi définir les modalités d'activation et de désactivation définies dans la partie 5.2.2.2, pour la MSPr et la MAP, relatives aux conditions de trafic sur le terrain d'étude.

Pour la MSPr, il s'agit de définir les heures d'activation et de désactivation de la VR2+. L'idée retenue est que la plage d'ouverture de la VR2+ couvre, en moyenne sur les 14 jours retenus, la durée de la période congestionnée. Le tableau 6.5 indique alors que l'heure moyenne de début de congestion est 6h41 et que l'heure moyenne de fin est 9h14. Afin que la démarche d'activation soit plus lisible pour les usagers, on décide d'activer la VR2+ au quart d'heure précédant cette heure moyenne de début de congestion, et de la désactiver au quart d'heure suivant cette heure moyenne de fin de congestion. La VR2+ est donc activée, sous cette modalité, entre 6h30 et 9h15. La procédure d'AVLA est enclenchée de sorte que la VR2+ soit bien activée à 6h30. Pour y parvenir, selon l'algorithme 4 présenté dans la partie 5.1.1.2, cette procédure se déclenche à 6h26 pour une VLA de 70 km/h, et à 6h26 pour une VLA de 50 km/h. Pour le cas d'une VLA à 90 km/h, étant donné que les VLA sont abaissées par pas de 20 km/h, l'activation de la VR2+ est simultanée à la seule étape d'AVLA.

Pour la MAP, il s'agit de déterminer les valeurs des seuils de débits opérationnels, en amont de la VR2+, permettant d'enclencher les procédures d'activation et de désactivation, là encore avec la démarche expliquée en partie 5.2.2.2. Avant toute chose, il convient d'indiquer que la vérification de l'atteinte de l'ensemble des seuils opérationnels, y compris donc ceux

Jour	Heure de début de congestion	Heure de fin de congestion
17/09/2019	6h42	9h24
18/09/2019	6h42	8h54
19/09/2019	6h42	9h36
20/09/2019	6h42	8h54
23/09/2019	6h36	9h24
26/09/2019	6h36	9h36
1 ^{er} /10/2019	6h42	9h24
2/10/2019	6h42	9h24
4/10/2019	6h42	9h00
8/10/2019	6h42	9h12
11/10/2019	6h42	8h54
14/10/2019	6h42	9h36
16/10/2019	6h42	9h00
18/10/2019	6h42	9h12
moyenne	6h41	9h14

TABLEAU 6.5 – Heures quotidiennes et moyenne de début et de fin de la congestion, au niveau de la sortie 0, pour les 14 jours retenus

liés à la vitesse, sera effectuée toutes les six minutes dans les simulations. En effet, il n'y a pas de raison de supposer que la période d'agrégation liée aux boucles soit modifiée entre la situation d'avant-projet et la situation où la VR2+ est déployée.

Puisque l'entrée 0, la seule située en amont de la VR2+, n'est pas la seule du réseau, une hypothèse additionnelle doit être formulée afin d'activer et de désactiver la VR2+ sur la base du débit qui y est observé, ainsi que prévu par le protocole de la MAP. Cette hypothèse s'appuie sur la figure 6.8, qui permet de comparer le débit à l'entrée 0 à la demande cherchant à s'écouler en sortie 0. Cette demande est obtenue en sommant le débit de chaque entrée affecté du coefficient du flux se dirigeant vers la sortie 0. On remarque qu'en périodes fluides,

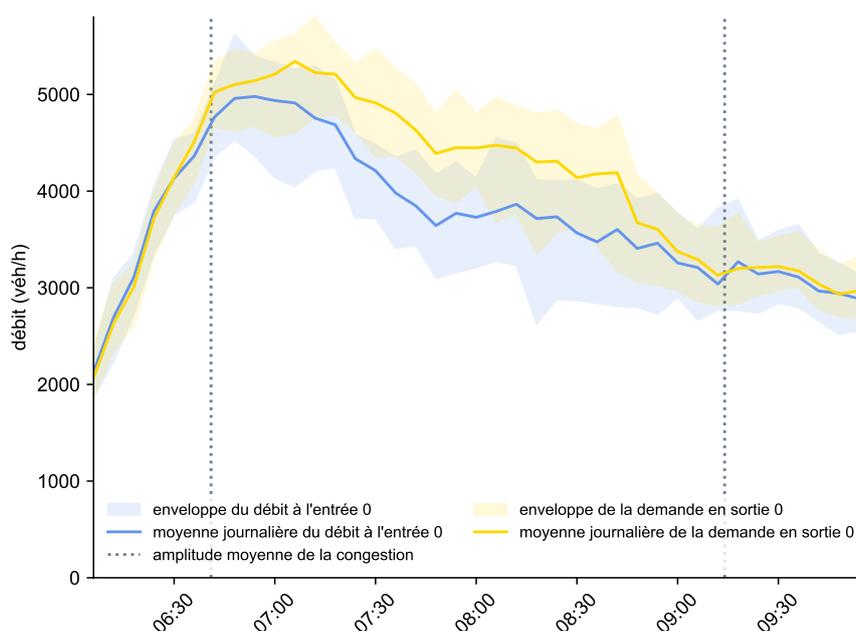


FIGURE 6.8 – Vers l'établissement des débits opérationnels de la MAP : comparaison journalière du débit à l'entrée 0 et du débit de demande en sortie 0 pour les 14 jours retenus

le débit à l'entrée 0 est une bonne approximation de la demande en sortie 0. On peut donc raisonner sur le débit à cette entrée afin de déterminer les débits opérationnels :

- pour l'activation, le débit retenu est la moyenne, sur les 14 jours, du débit observé durant la période de six minutes précédant le début de la congestion. Cela s'explique par la croissance de la demande en période fluide pré-congestion et permet donc de déclencher la procédure avant l'activation de la restriction de capacité. C'est d'autant plus pertinent que l'on peut calculer que le temps de parcours à vide entre la boucle U2 et la boucle N2 est de six minutes. Le débit retenu vaut alors 4366 véh/h;
- pour la désactivation, le débit retenu est la moyenne, sur les 14 jours, du débit observé durant les deux périodes de six minutes suivant la fin de la congestion. En élargissant à l'ensemble de la période fluide post-congestion, le risque est de sous-estimer le débit de décongestion et donc d'activer plus longtemps que nécessaire la VR2+. Le débit retenu vaut alors 3217 véh/h.

6.1.4.3 Récapitulation

La figure 6.9 résume les principaux points de l'adaptation de la méthode d'évaluation au modèle en simulation.

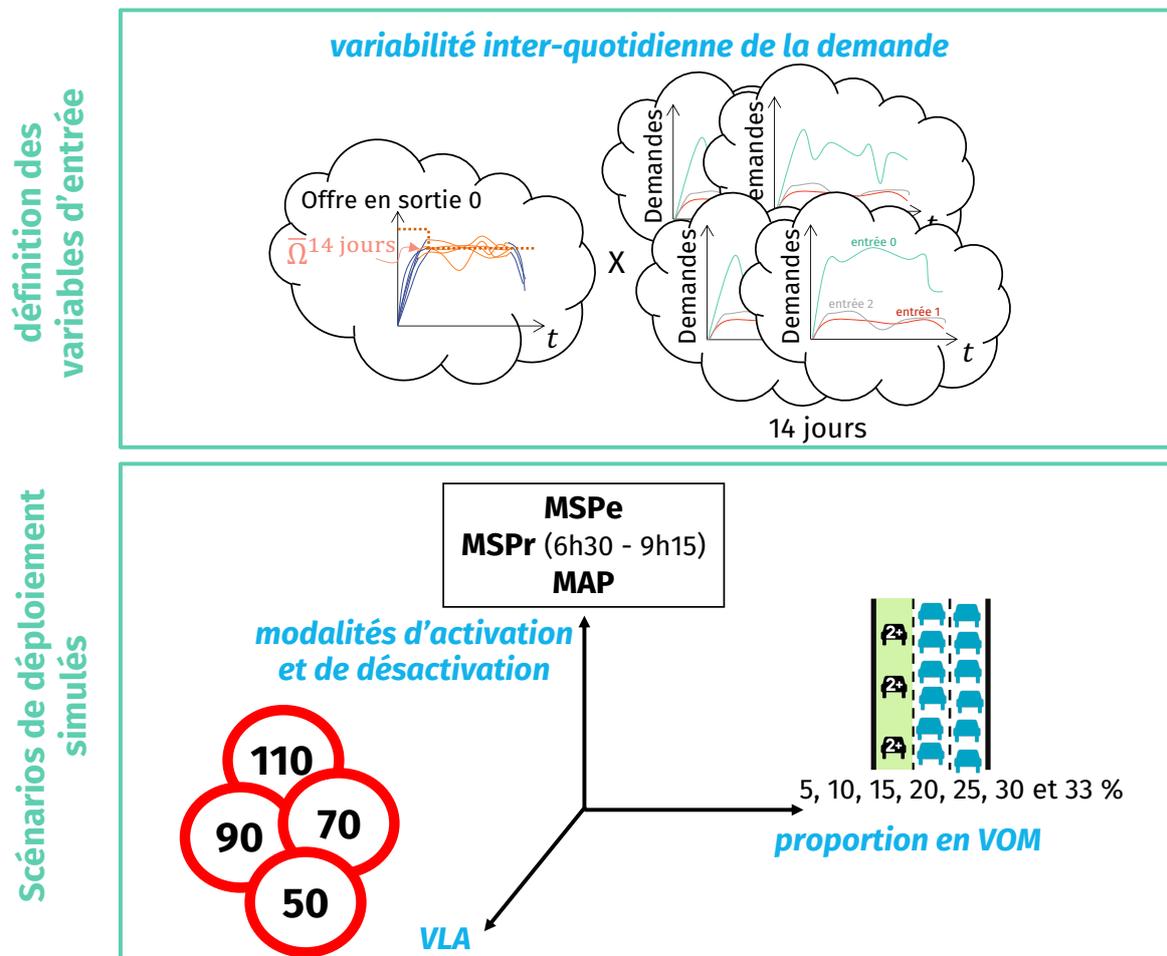


FIGURE 6.9 – Adaptations principales de la méthode d'évaluation au terrain reproduit en simulation

6.1.5 Calage des paramètres pour s'assurer d'un écoulement cohérent

Avant de pouvoir réaliser l'évaluation du système simulé, il reste à s'assurer que l'écoulement reproduit en simulation sur le terrain d'étude est cohérent. Le but de cette partie est alors de déterminer les paramètres du simulateur assurant cette cohérence, qui seront repris pour simuler les scénarios présentés dans la partie précédente.

Il est à noter qu'en toute rigueur, cette démarche aurait dû être conjointe à celle de l'ajustement de la matrice origine-destination, mais qu'au vu de cette démarche très coûteuse en temps, on s'est contenté de la cohérence de la matrice obtenue à partir de l'enquête minéralogique.

6.1.5.1 Caler et valider : démarche entreprise pour ces étapes indispensables

Pour construire le modèle simulé, il faut s'assurer qu'il reproduise les conditions de trafic caractérisées par les données à disposition. Le calage de l'écoulement du trafic vise donc à s'assurer que le modèle reproduit fidèlement l'extension spatiale et temporelle de la congestion constatée sur le terrain à partir des données boucle. Pour ce faire, les paramètres du simulateur doivent être ajustés de sorte à minimiser l'écart entre les résultats simulés avec ces paramètres et les données de terrain, ce dont un ou plusieurs indicateur(s) rend(ent) compte. Ces paramètres sont relatifs :

- à la matrice origine-destination qui indique, pour chaque entrée du réseau, la proportion de véhicules quittant le réseau à chaque sortie ;
- et à l'écoulement du trafic, en s'attachant, en simulation microscopique, aux paramètres individuels qui permettent de décrire la dynamique du véhicule.

Cette étape de réglages se nomme le *calage*. Puisqu'on a à disposition une large gamme de données relatives aux périodes de pointe du matin d'un même réseau, tout l'objectif est de caler les paramètres de sorte qu'il soit adapté à la globalité des périodes de pointe. Cela assurerait alors la capacité prédictive du modèle ainsi créé, donc sa robustesse.

Une étape est alors indispensable afin de vérifier cette capacité prédictive, celle de la *validation*. Supposons que le calage soit réalisé pour un certain ensemble de données. Il s'agit d'abord d'appliquer les paramètres obtenus par ce calage pour une situation utilisant un ensemble de données différentes de celles de l'ensemble utilisé pour le calage. On vérifie ensuite si les résultats alors simulés à partir de cette situation sont similaires à ceux simulés pour les données utilisées pour le calage. Si c'est le cas, le modèle est validé. Une variante consiste, si l'on dispose d'un grand nombre de données, à diviser ce groupe de données en $m > 2$ ensembles, de réaliser, pour ces m ensembles, le calage, puis la démarche de validation sur chacun des $m - 1$ autres ensembles.

Il s'agit alors de déterminer les ensembles de données retenus pour la création du modèle. Les éléments de ces ensembles sont les données relatives à la période de pointe du matin d'un jour particulier. On choisit alors les jours de semaine parmi les 25 dont on dispose, selon ces critères :

- les jours où des boucles présentent des défauts, comme des pannes ou un sous-comptage de véhicules, ne sont pas retenus, le risque étant de mal estimer les variables du trafic ;
- tout comme pour le choix des jours utilisés pour les scénarios de déploiement, les jours présentant une congestion de durée ou de longueur exceptionnellement étendue, donc non représentative des conditions usuelles, sont écartés ;
- les jours présentant des fluctuations trop importantes et récurrentes de vitesse sur au moins l'une des boucles de la section courante sont aussi mis de côté. Ce critère

est illustré sur la figure 6.10. Ces fluctuations sont le signe d'une congestion pas assez installée en ce que les états de trafic fluides et congestionnés s'enchaînent.

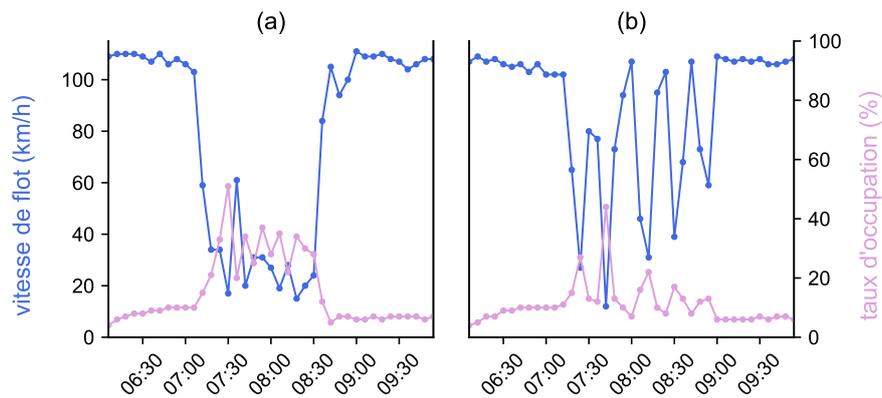


FIGURE 6.10 – Chroniques de la vitesse de flot et du taux d'occupation pour la boucle T2 le (a) 26 septembre 2019 et le (b) 17 octobre 2019. La situation (a) présente une congestion installée, au contraire de la situation (b)

Pour les 25 jours de semaine dont on dispose, le tableau 6.4, déjà présenté dans la partie 6.1.3.3, synthétise le choix effectué et les justifications associées. Il est important de retenir que la démarche de calage assure qu'on peut utiliser, pour caler, des jours différents de ceux retenus pour les scénarios qui seront simulés.

À partir des neuf jours alors retenus, deux ensembles de jours sont créés. Les jours les composant sont tirés aléatoirement, avec la contrainte d'avoir une représentation équilibrée à la fois de jours issus de la même semaine et des jours de la semaine. Les conditions de trafic pouvant changer d'un jour à l'autre et d'une semaine à l'autre (Shao *et al.*, 2014 ; Hale *et al.*, 2016 ; Wunderlich *et al.*, 2018), les deux ensembles créés sont alors homogènes, ce qui assure la cohérence d'une démarche pour un calage robuste. La répartition finale est alors :

- ensemble 1 : vendredi 20 septembre (semaine 1), vendredi 27 septembre (semaine 2), mardi 1^{er} octobre (semaine 3), mercredi 2 octobre (semaine 3), mercredi 16 octobre (semaine 5) ;
- ensemble 2 : mercredi 18 septembre (semaine 1), vendredi 4 octobre (semaine 3), vendredi 11 octobre (semaine 4), jeudi 17 octobre (semaine 5).

6.1.5.2 Mise en œuvre de la méthode de calage et de validation

Pour réaliser le calage, les principaux paramètres du modèle de poursuite de Newell, implémenté dans SymuVia, sont explorés :

- la vitesse maximale de remontée de congestion w ;
- la densité maximale pour une voie κ ;
- la vitesse de relaxation ε ;
- l'accélération maximale a .

Les deux premiers paramètres sont macroscopiques. Cependant, ainsi qu'on l'a vu dans le chapitre 2 en écrivant l'équation cinématique 2.4 qui décrit le modèle, ces paramètres sont directement reliés à ceux microscopiques. Aussi, en faisant l'hypothèse raisonnable que les véhicules cherchent à circuler à la VLA indiquée, l'influence de la vitesse désirée n'est pas explorée. Cette vitesse est alors fixée à 110 km/h, soit la VLA usuelle sur la section courante.

Le calage suppose d'avoir à disposition des métriques permettant de rendre compte de la minimisation de l'écart entre les conditions de trafic mesurées et celles simulées. Ces métriques s'appuient ici sur l'étude de la vitesse de flot sur l'ensemble des boucles de la

section courante, cette grandeur renseignant sur l'état fluide ou congestionné du trafic. Le phénomène intéressant ici est en effet la propagation de la congestion sur la section où circulent la majorité des véhicules. Deux indicateurs de calage sont alors proposés :

- principalement, la proportion des conditions de trafic correctement reproduites, notée I_A . Le principe est de compter les périodes de six minutes pour lesquelles les vitesses de flot simulées et observées sont simultanément au-dessus ou en-dessous d'un seuil traduisant l'installation de la congestion, auquel cas on considère que l'état du trafic est correctement reproduit. On fixe arbitrairement ce seuil à 85 km/h, valeur encore assez élevée pour considérer qu'au-delà les conditions tendent vers la fluidité, et qui permet de filtrer les fluctuations de vitesse les plus importantes. Afin encore de lisser l'impact des fluctuations ne passant pas ce filtre, on considère comme congestionnée une période fluide située entre deux périodes congestionnées. La figure 6.11 permet d'illustrer le principe de comptage des périodes pour lesquelles les conditions de trafic sont mal reproduites par le simulateur, principe sur lequel est basé le calcul de I_A . Cet indicateur doit être maximisé : plus il est grand et plus on s'assure que la congestion simulée débute et termine aux bonnes heures ;

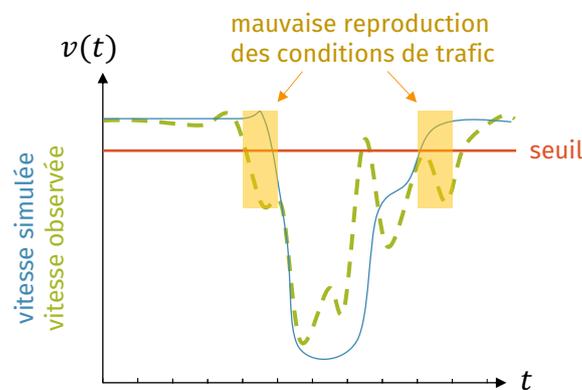


FIGURE 6.11 – Illustration du comptage des périodes pendant lesquelles les conditions de trafic sont mal simulées

- en complément, la racine de l'erreur quadratique moyenne, dite encore *root-mean-square error* (RMSE), notée I_B . Cet indicateur est proportionnel à la différence, au carré, entre la vitesse mesurée et celle observée, et doit donc être minimisé.

On peut maintenant faire varier les paramètres pour caler. La démarche entreprise est alors la suivante :

- on étudie successivement la sensibilité au couple $(w ; \kappa)$, puis à ε , puis à a . En effet, l'ensemble admissible des valeurs pour chaque paramètre est large, et dix répliquions sont considérées pour apprécier le comportement moyen du trafic. Il est donc très coûteux en temps de faire varier l'ensemble des quatre paramètres simultanément, en utilisant par exemple une méthode d'optimisation bayésienne ;
- cette sensibilité est alors étudiée par recherche dichotomique. Pour chaque paramètre, on explore d'abord l'ensemble des valeurs admissibles avec un pas grossier puis on détermine le paramètre optimisant les indicateurs. On recommence alors avec un pas plus fin sur un ensemble centré autour de ce paramètre. Cette démarche est répétée jusqu'à ce que le pas soit assez fin. L'ensemble des valeurs admissibles considérées sont :
 - pour le couple $(w ; \kappa)$, une étude grossière du diagramme fondamental obtenu avec les données boucle permet d'aboutir à l'ensemble $[15 ; 30] \text{ km/h} \times [85 ; 150] \text{ véh/km}$. Cet espace est exploré, au fil des étapes, par pas successifs de $5 \text{ km/h} \times 5 \text{ véh/km}$, $2,5 \text{ km/h} \times 2,5 \text{ véh/km}$, puis $0,5 \text{ km/h} \times 0,5 \text{ véh/km}$, une

- précision plus élevée n'étant pas nécessaire;
- les valeurs de ε sont explorées dans l'ensemble $[0 ; 10]$ m/s par pas de 1 m/s, puis de 0,5 m/s puis, s'il y a lieu, de 0,1 m/s, la sensibilité liée à la relaxation du trafic pouvant être forte (Laval et Leclercq, 2008 ; Duret, 2010);
- les valeurs de a sont explorées dans l'ensemble $[0 ; 10]$ m/s² par pas de 1 m/s², puis de 0,5 m/s².
- pour chaque paramètre, à chaque étape de la recherche dichotomique :
 - pour chaque réplication, chacun des deux indicateurs sont agrégés sur la totalité des boucles, avant de les moyenner sur l'ensemble des réplifications;
 - le vecteur des paramètres choisi pour passer à l'étape suivante est celui maximisant I_A . Si plusieurs vecteurs aboutissent à des valeurs similaires pour cet indicateur, c'est alors la valeur de I_B qui permet de trancher.

Pour les deux ensembles considérés dans la partie 6.1.5.1, les paramètres optimaux obtenus par le calage sont \vec{p}_1^* et \vec{p}_2^* .

tendus par le calage sont $\vec{p}_1^* = \begin{bmatrix} w = 25,5 \text{ km/h} \\ \kappa = 95 \text{ véh/km} \\ \varepsilon = 1 \text{ m/s} \\ a = 4 \text{ m/s}^2 \end{bmatrix}$ et $\vec{p}_2^* = \begin{bmatrix} w = 21 \text{ km/h} \\ \kappa = 112 \text{ véh/km} \\ \varepsilon = 0,8 \text{ m/s} \\ a = 3 \text{ m/s}^2 \end{bmatrix}$. La démarche

de validation est alors réalisée. Ses résultats, joints à ceux du calage, sont consignés dans le tableau 6.6 en calculant les indicateurs moyennés sur les jours constituant chaque ensemble. Ce tableau indique que les situations congestionnées sont bien reproduites, bien que les valeurs de la RMSE semblent plutôt élevées. Il indique aussi que les valeurs des indicateurs dans l'étape de validation sont similaires à celles du calage, ce qui permet de valider ce dernier. Si l'on calcule les indicateurs sur la totalité des jours et non plus ensemble par ensemble, on remarque que les résultats avec \vec{p}_1^* ou avec \vec{p}_2^* sont quasiment égaux (91,2 % contre 91,4 % pour I_A ; 17,4 km/h contre 17,3 km/h pour I_B). Le choix entre les deux vecteurs peut donc se faire de manière arbitraire. Cependant, la valeur de κ dans \vec{p}_1^* est plutôt faible, elle correspond à une longueur moyenne de véhicules plus élevée que ce qui est usuellement observé. On préférera donc utiliser \vec{p}_2^* pour rendre compte des conditions de trafic sur l'A7.

		Ensemble 1	Ensemble 2
I_A (%)	\vec{p}_1^*	90,4	92,2
	\vec{p}_2^*	89	94,4
I_B (km/h)	\vec{p}_1^*	17,7	17,1
	\vec{p}_2^*	18,9	15,2

TABLEAU 6.6 – Résultats du calage (vecteur \vec{p}_i^* appliqué à l'ensemble i) et de la validation (vecteur \vec{p}_j^* appliqué à l'ensemble i)

6.2 Évaluation du système simulé

6.2.1 Résultats de l'évaluation générique

6.2.1.1 Maîtrise de la congestion

La maîtrise de la congestion est mesurée par l'allongement de la file d'attente maximale par rapport à la situation d'avant-projet, qui est la situation de référence.

Le tableau 6.7 présente, suivant les configurations simulées, la moyenne, sur les 14 jours, de cet allongement, ainsi que la variabilité liée à cette moyenne. L'allongement moyen maximum de 26 % correspond à une remontée de la congestion jusqu'à l'entrée du réseau. La lecture du tableau indique donc que la congestion remonte, dans l'immense majorité

des cas, jusqu'à cette entrée. Quand bien même ce n'est pas le cas, ce qui correspond à des situations à VLA et à proportions en VOM plus élevées, la file d'attente s'arrête très près de cette entrée. Cette emprise de la congestion s'explique aussi par la faible distance entre le début de la VR2+ de l'entrée du réseau, qui est de 2,2 km.

α (%)	VLA (km/h)	Modalité	Moyenne de l'allongement de la file d'attente maximale (%)	Écart-type (%)
33	110	toutes	23	14
30	90	MSPe, MSPr	25	16
30	110	MAP		
30	110	MSPr	25	17
30	90	MAP	24	15
toute autre configuration			26	19

TABLEAU 6.7 – Allongement de la file d'attente maximale suivant la configuration simulée

6.2.1.2 Effectivité du déploiement pour la MAP

L'effectivité de la MAP est mesurée par les temps d'activation et de désactivation de la VR2+. Cette mesure permettra de plus de mieux comprendre les résultats liés à la crédibilité et à la pertinence du déploiement sous cette modalité.

La figure 6.12 montre l'influence de la proportion en VOM et de la VLA sur l'heure d'activation de la VR2+. L'écart-type vaut 4 minutes, et ce pour toutes les configurations, ce qui montre que la VR2+ est activée tous les jours à la même heure, à une période de six minutes près. La seule différence se constate suivant la valeur de la VLA, un écart étant induit par le temps nécessaire à l'AVLA. La procédure d'activation est donc effective.

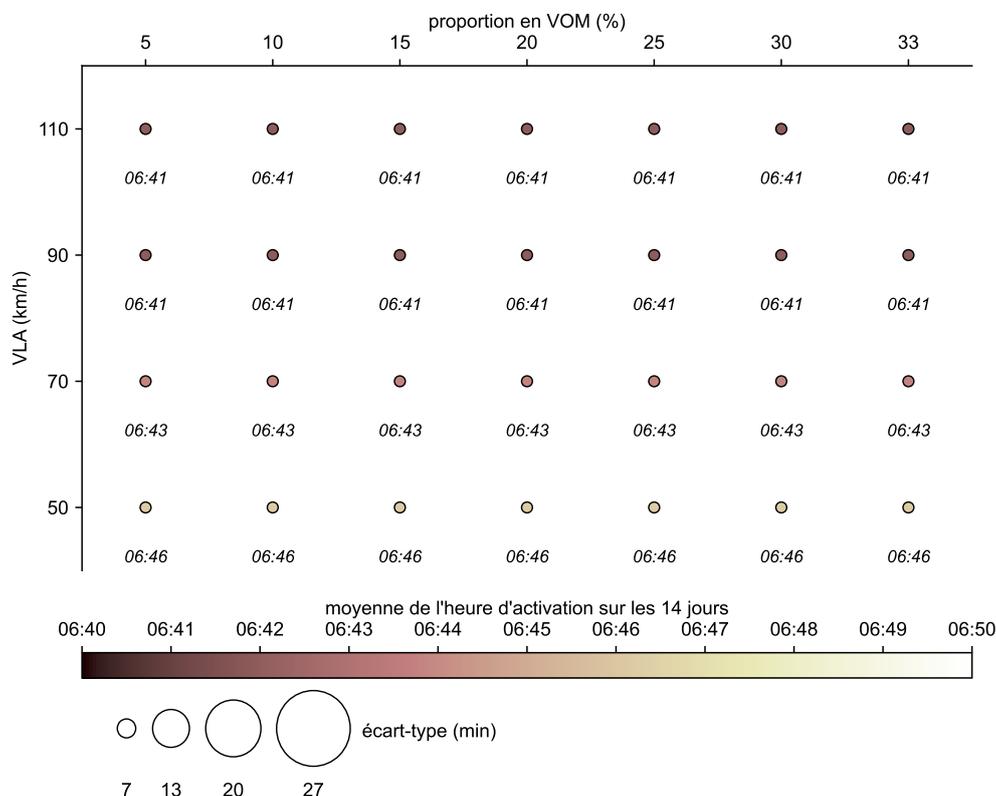


FIGURE 6.12 – Heure d'activation de la VR2+, pour la MAP, suivant la proportion en VOM et la VLA

La figure 6.13 montre l'influence de la proportion en VOM et de la VLA sur l'heure de désactivation de la VR2+. On remarque qu'elle augmente avec la proportion en VOM et la VLA. Les VLA trop restrictives de 50 et 70 km/h induisent des heures de désactivation très précoces, bien que peu variables d'un jour à l'autre, par rapport à l'heure de fin de la congestion, tout comme les proportions en VOM inférieures à 30 %. Puisqu'on sait que la congestion remonte jusqu'à l'entrée du réseau, cela signifie, selon le protocole de la MAP, que ces configurations induisent une sous-alimentation de la restriction de capacité en aval. Alors activée pendant moins d'une heure, l'intérêt de la VR2+ se trouve limité pour ces configurations, qui représentent la majorité de celles étudiées. Ainsi, la plage de pertinence de la MAP se trouve pour des VLA élevées et des proportions en VOM permettant de friser l'équirépartition du débit sur les trois voies, configurations s'approchant de la situation d'avant-projet. Une telle dissymétrie dans les résultats est, au fond, logique puisque les seuils d'activation et de désactivation ont été calés sur cette situation. L'empreinte de la situation d'avant-projet et de ses heures de fin de congestion très variables se retrouve d'ailleurs dans la forte variabilité de l'heure de désactivation.

Finalement, la MAP ainsi construite n'est pas effective : soit la période d'activation est trop courte, soit l'heure de désactivation varie trop d'un jour à l'autre.

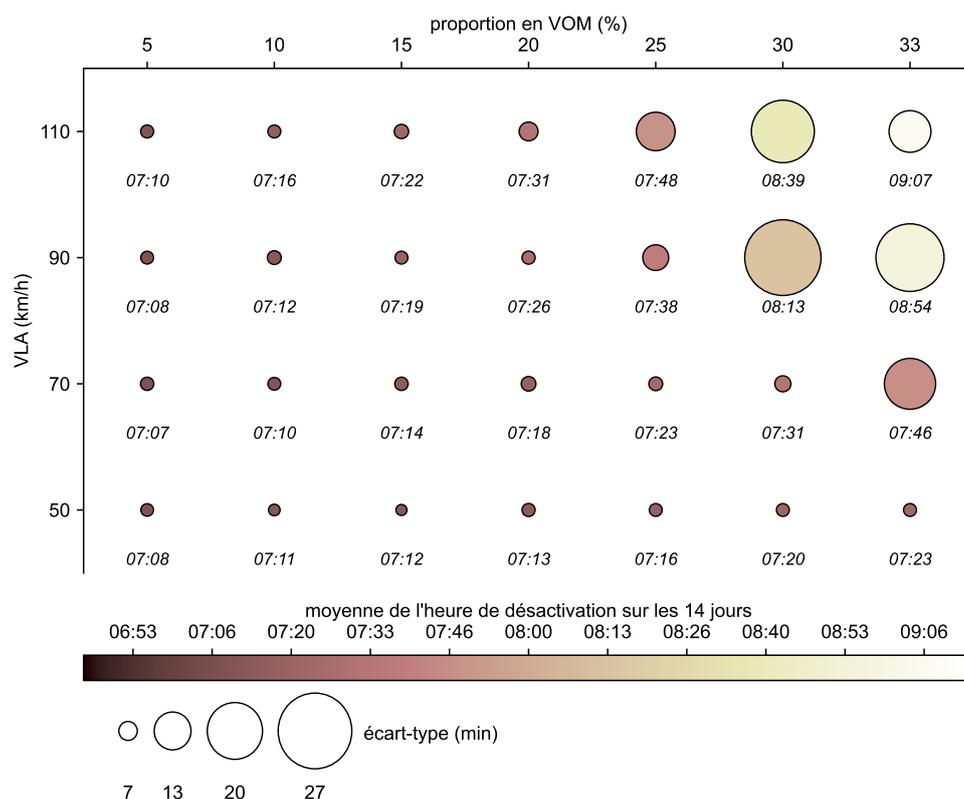


FIGURE 6.13 – Heure de désactivation de la VR2+, pour la MAP, suivant la proportion en VOM et la VLA

6.2.1.3 Crédibilité du déploiement

La crédibilité du déploiement est mesurée par la différence entre les retards moyens des VOM et ceux des VI. Si cette différence est négative, alors les VOM gagnent, en moyenne, du temps par rapport aux VI, ce qui est l'effet recherché en déployant une VR2+.

La figure 6.14 présente, suivant les configurations simulées, la moyenne, sur les 14 jours, de cette différence, ainsi que la variabilité liée à cette moyenne. On remarque que les VOM gagnent toujours du temps par rapport aux VI, ce qui signifie que le déploiement est crédible. Ces gains, dans les configurations présentant une VLA de 50 km/h et pour celles présentant à la fois des VLA supérieures et des proportions en VOM inférieures à 25 %, sont relativement constants, de l'ordre de 12 à 24 % (resp. de 2 à 12 %) pour les modalités statiques (resp. la MAP), et peu variables d'un jour à l'autre.

Une augmentation de la VLA conjuguée à celle de la proportion en VOM amène des gains significatifs. Cela s'explique par deux raisons. D'abord, le différentiel de vitesse entre VOM et VI augmente avec la VLA, les VOM circulant encore plus vite que les VI roulant sur les VG congestionnées. Ensuite, à nombre constant de véhicules comme c'est le cas ici, augmenter la proportion de ceux pouvant circuler sur une voie fluide implique que davantage de véhicules circulent plus rapidement. De plus, cette augmentation, comme on l'a vu dans la partie précédente, induit une meilleure alimentation de la restriction de capacité en aval. On se souvient notamment que de faibles proportions en VOM aboutissent à une capacité plus faible au niveau de l'interface amont, donc à un débit moindre vers l'aval. La consistance, pour de hautes proportions en VOM, de la congestion en aval assure alors sa répercussion sur les VG et donc sur les retards des VI. Ce dernier point explique d'ailleurs la baisse de la variabilité inter-quotidienne avec celle de la proportion en VOM. L'interface amont agissant alors comme un filtre au niveau du débit s'écoulant sur la VR2+, les effets des variations inter-quotidiennes de la demande sont atténués. En ajoutant à cela que la capacité en aval est constante au fil des jours, la variabilité des retards est donc plus faible.

Alors que les résultats des deux modalités statiques sont similaires, ceux de la MAP se distinguent. Leur analyse découle des explications de la partie 6.2.1.2. Ils montrent qu'en dehors de la plage de pertinence liée à cette modalité, le gain pour les VOM est presque négligeable. De plus, même dans cette plage de pertinence, les résultats, en plus d'être plus variables d'un jour à l'autre, ne sont pas meilleurs que pour les modalités statiques.

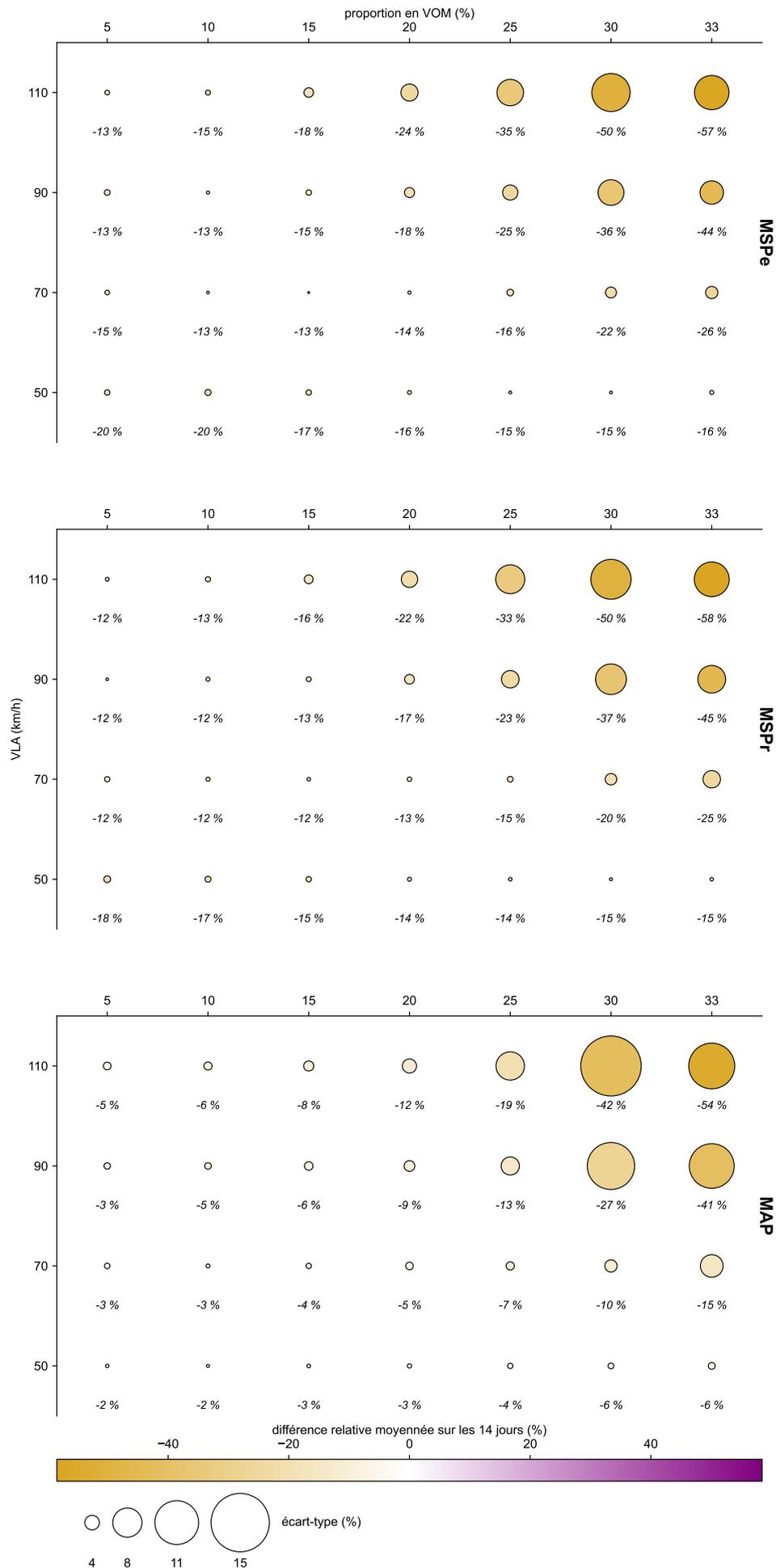


FIGURE 6.14 – Différence relative des retards moyens des VOM par rapport à ceux des VI, suivant la proportion en VOM, la VLA et la modalité

6.2.1.4 Pertinence du déploiement

La pertinence du déploiement est mesurée par la différence entre les retards moyens des VOM lorsque la VR2+ est déployée et lors de la situation d'avant-projet. Si cette différence est négative ou nulle, alors les VOM sont assurés de ne pas perdre de temps, en moyenne, par rapport à la situation d'avant-projet. Il faut dans le même temps s'assurer que les VI ne gagnent pas de temps par rapport à la situation d'avant-projet.

La figure 6.15 (resp. 6.16) présente, suivant les configurations simulées, la moyenne, sur les 14 jours, de la différence des retards des VOM (resp. VI) par rapport à la situation d'avant-projet, ainsi que la variabilité liée à cette moyenne. On remarque que les VI perdent du temps pour toutes les configurations, tandis que les VOM n'en gagnent que pour trois configurations, quelle que soit la modalité : une VLA de 110 km/h couplée à une proportion de VOM de 30 % ou de 33 %, et une VLA de 90 km/h couplée à une proportion en VOM de 33 %. Le déploiement n'est donc pertinent que pour ces trois configurations.

Les variations, suivant la configuration, de la moyenne et de sa variabilité inter-quotidienne sont les mêmes pour les VOM que pour les VI. Sans surprise, la baisse de la VLA induit une forte hausse des retards, qui peuvent être jusqu'à plus de 20 fois supérieurs à ceux d'avant-projet. Rappelons que conformément à la méthodologie exposée dans la partie 6.1.4.1, le temps de parcours d'un véhicule correspond à la différence entre son temps de sortie du réseau et son temps de création. La forte hausse des retards s'explique donc par l'attente des véhicules entre leur instant de création et celui de leur entrée effective du réseau. Or, plus la proportion en VOM est faible et plus la capacité de l'interface amont, située tout juste en aval de l'entrée 0 d'où viennent la majorité des véhicules, est restrictive. La restriction de capacité formée par l'interface amont peut donc expliquer cette hausse des temps d'attente et donc celle des retards, d'autant plus que les retards entre les deux modes sont très similaires. Un autre argument en faveur de cette explication est la hausse de la variabilité inter-quotidienne avec la baisse de la proportion en VOM. Comme on l'a déjà dit, l'interface amont agit comme un filtre sur la demande d'autant plus que la proportion en VOM est faible, participant alors à l'uniformisation des conditions de trafic quel que soit le jour. En comparant à la situation de référence, empreinte de la variabilité inter-quotidienne de la demande, cela explique les forts écarts-types. Pour le confirmer encore, les résultats liés à la MAP pour ces cas-ci montrent que la variabilité est moindre, puisque la VR2+ est désactivée très tôt et donc que les conditions de trafic s'approchent davantage de la situation d'avant-projet.

6.2.1.5 Conclusion et ouverture

Au niveau des enjeux opérationnels concernant le développement des VR2+ sur le territoire, il ressort des résultats de l'étude générique que :

- l'AVLA pour des seuils très restrictifs, notamment 70 et 50 km/h, est contre-productif si l'objectif du déploiement est d'inciter au covoiturage en promouvant la garantie de meilleurs temps de parcours par le fait de prendre la VR2+. Cet AVLA induit en effet de trop importants retards par rapport à la situation d'avant-projet. Cela aboutit alors à un déploiement ni crédible, ni pertinent ;
- au niveau des modalités d'activation et de désactivation :
 - la performance des deux modalités statiques est sensiblement la même dès lors que la MSPr couvre la période moyenne, sur les jours étudiés, de congestion. La modalité à choisir dépend alors du positionnement du déploiement dans la stratégie plus globale en termes de report modal vers les mobilités partagées. Dans cette stratégie, le rôle du gestionnaire de VR2+ est donc de choisir entre une activation permanente et qui peut paraître punitive pour les usagers, et une activation par plages fixes qui peut leur paraître, au contraire, plus acceptable. Au

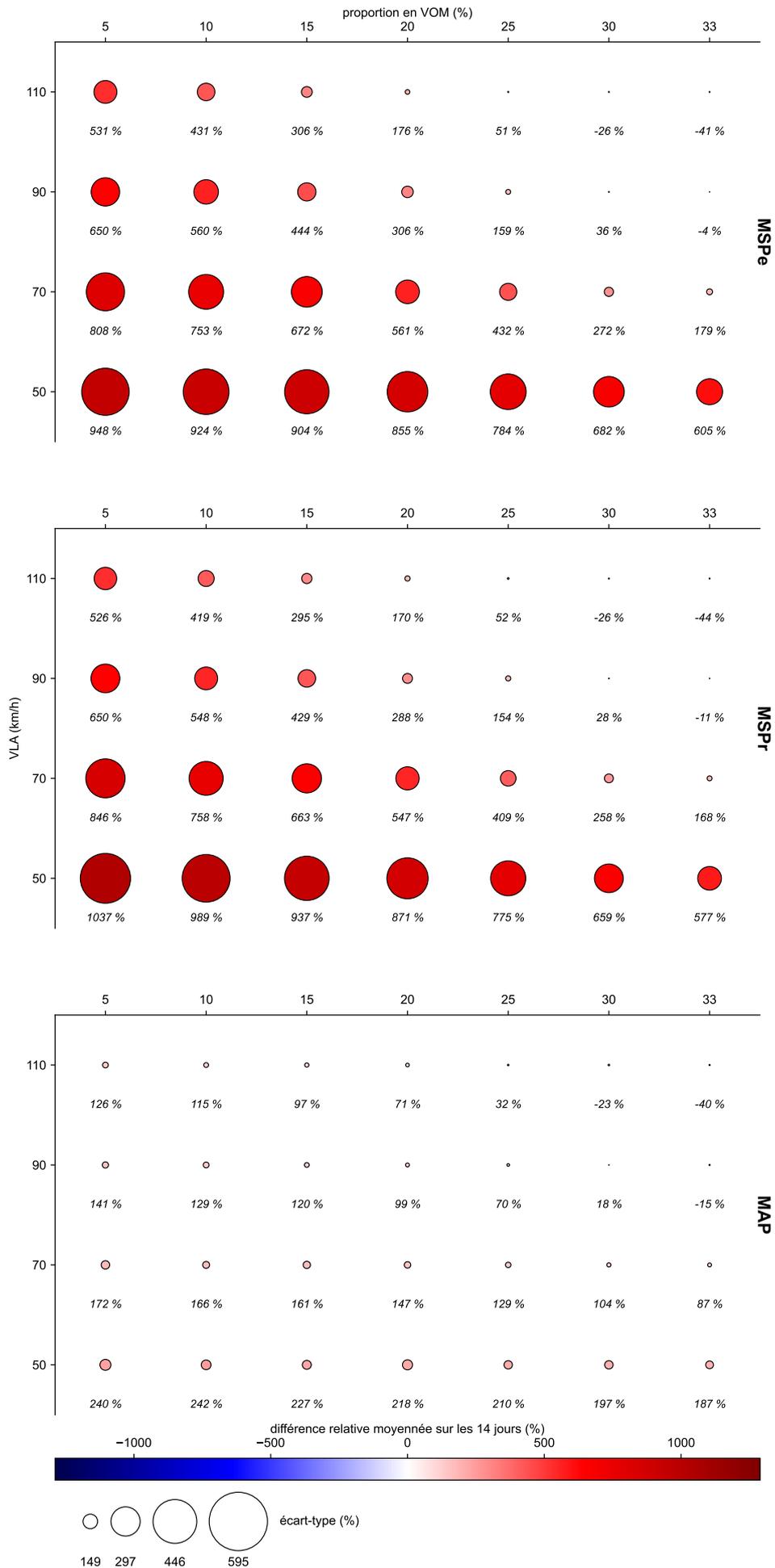


FIGURE 6.15 – Différence relative des retards moyens des VOM par rapport à la situation de référence, suivant la proportion en VOM, la VLA et la modalité

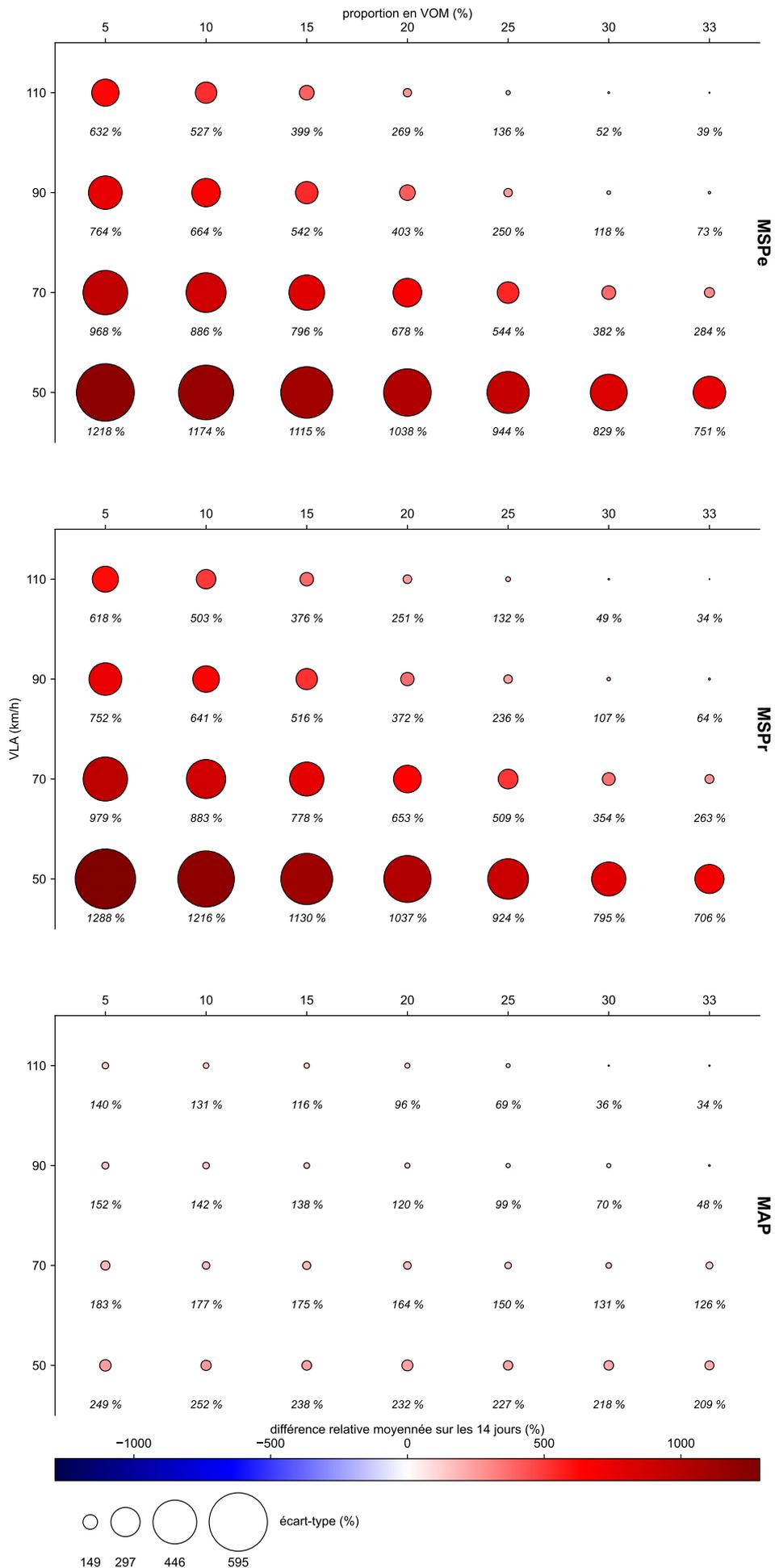


FIGURE 6.16 – Différence relative des retards moyens des VI par rapport à la situation de référence, suivant la proportion en VOM, la VLA et la modalité

sujet de cette acceptabilité pour la MSPr, il serait utile de poursuivre les travaux en étudiant l'influence d'une activation plus tardive et d'une désactivation plus anticipée sur la performance, par exemple un décalage de 5 à 15 minutes par rapport aux heures proposées ici ;

- la MAP ainsi proposée ne permet pas d'aboutir à un système performant. Au mieux, elle permet d'obtenir la même performance que pour les modalités statiques. Un travail approfondi au niveau du choix des seuils opérationnels mériterait d'être mené afin de définitivement déterminer si les modalités adaptatives ont un intérêt pour la performance des VR2+. Ce choix peut amener à considérer des seuils différents d'une configuration à une autre, pour tenir compte, par exemple, de la congestion induite par une faible proportion en VOM ainsi que constatée dans les résultats ;
- à plus long terme, dans une visée d'accompagnement de la modification de la demande en déplacements, il est important de garder à l'esprit que les seuils temporels ou opérationnels doivent évoluer avec cette modification afin d'assurer la performance de la VR2+ au fil du temps ;
- pour le terrain d'étude tout du moins, les VOM gagnent toujours du temps par rapport aux VI. Cependant, sauf pour des configurations présentant de très fortes proportions en VOM, c'est au prix d'un temps de parcours dégradé par rapport à la situation d'avant déploiement, et ce même avec une VLA inchangée. Cela va contre le principe de la récompense, par un temps de parcours moindre, d'un comportement plus vertueux de l'utilisation de la voiture adopté par les covoitureurs. À plus ou moins long terme après le déploiement, ce principe ne pourra donc être décrit que, à partir des indicateurs développés ici, par la différence entre les retards des VI et des VOM.

6.2.2 Vers une vision prospective

On propose d'étendre l'étude générique à un scénario prospectif visant à décrire, toujours pour le même terrain d'étude, l'évolution de la demande en trafic à moyen ou long terme. L'étude générique précédente permet en effet d'appréhender la performance tactique dans un horizon temporel proche de la date de déploiement de la VR2+. Cependant, on ne peut pas l'utiliser pour appréhender les évolutions de la demande en trafic. Comme on l'a vu tout au long de cette thèse, on ne peut pas savoir, avec les seuls outils de la théorie du trafic, comment évoluent les habitudes des usagers quant à leurs pratiques de mobilité, ce qui est davantage le ressort des disciplines socio-économiques. Le scénario prospectif proposé n'en est donc qu'un possible parmi d'autres.

6.2.2.1 Positionnement du scénario proposé

L'évaluation de la performance du terrain d'étude a permis de montrer que le déploiement est crédible. Il n'est cependant pertinent que pour de très hautes proportions en VOM qui sont difficiles à obtenir à long terme (Gray *et al.*, 1995 ; Skowronek *et al.*, 2002 ; Martin *et al.*, 2004), donc *a fortiori* d'autant plus au moment de l'ouverture de la VR2+. L'enjeu principal est donc de déterminer si, avec l'évolution de la demande en trafic, quelles qu'en soient les raisons, les VOM gagnent enfin du temps par rapport à la situation d'avant-projet.

Pour ce faire, supposons d'abord être dans une situation où la mise en œuvre de la stratégie globale liée au covoiturage induit une augmentation de la pratique. On se propose alors ici d'étudier l'influence de l'augmentation de la proportion en covoitureurs parmi les personnes qui transitent par l'axe étudié. À partir de cette augmentation, on peut déterminer, comme on le montrera ci-après, une nouvelle demande en VOM et, par conséquent, une

nouvelle proportion induite en VOM. Chaque valeur de proportion en covoitureurs étudiée correspondra à une certaine situation prospective. Une étude utilisant une méthodologie similaire a été proposée par [Hans et al. \(2021\)](#), mais les auteurs ne déterminent pas la proportion en VOM induite à partir de la proportion en covoitureurs, et l'imposent plutôt de manière exogène. De plus, l'intérêt opérationnel des travaux se limitait à la proportion en VOM induite nécessaire afin que la file d'attente n'atteigne pas le nœud de Ternay, échangeur autoroutier non considéré dans l'actuelle étude, et non pas aux temps de parcours.

Les autres hypothèses de modélisation posées sont les suivantes :

- au niveau des modalités, on ne considérera que la MSPr, qui paraît être la plus souple;
- on suppose que l'on se situe à un temps plus ou moins court après le déploiement de la VR2+, de sorte que :
 - le nombre total d'utilisateurs reste constant avec l'augmentation de la proportion en covoitureurs;
 - la matrice origine-destination, tout comme l'offre en aval, restent inchangées;
 - il n'y ait pas besoin de revoir, dans l'immédiat, les horaires d'ouverture de la VR2+;
- on continuera d'étudier l'influence de la VLA pour vérifier si elle peut, dans cet horizon allant du court au moyen terme, être utile.

6.2.2.2 Définition du scénario et des variables utilisées

Pour pouvoir établir le scénario quantifiant l'impact de l'évolution du nombre de covoitureurs à nombre constant de passagers et pour pouvoir faire le lien avec les demandes implémentées en simulation, plusieurs variables doivent être introduites, tout comme les relations qui les relient.

On note ω la proportion de covoitureurs parmi les passagers. Aussi, on note P ce nombre de passagers, ces derniers étant répartis dans N véhicules selon une occupation moyenne $\bar{\rho}$, de sorte que l'on puisse écrire :

$$P = \bar{\rho}N$$

Le trafic étant composé de VOM et de VI, on a ainsi, par extensivité de N :

$$N := N_{\text{VOM}} + N_{\text{VI}} = \frac{P_{\text{VOM}}}{\bar{\rho}_{\text{VOM}}} + \frac{P_{\text{VI}}}{\bar{\rho}_{\text{VI}}}$$

Les VOM (resp. VI) sont remplis par les $P_{\text{VOM}} := \omega P$ covoitureurs (resp. $P_{\text{VI}} := (1 - \omega)P$ autosolistes). On a donc :

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{\rho}_{\text{VOM}}\bar{\rho}_{\text{VI}}}{\omega\bar{\rho}_{\text{VI}} + (1 - \omega)\bar{\rho}_{\text{VOM}}} \quad (6.1)$$

Ainsi, puisque $\alpha := N_{\text{VOM}}/N$, il vient :

$$\alpha = \omega \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_{\text{VOM}}}$$

i.e.

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{\bar{\rho}_{\text{VOM}}}{\bar{\rho}_{\text{VI}}} \frac{1 - \omega}{\omega}} \quad (6.2)$$

L'occupation des VI est par hypothèse de 1 pax/véh, ce qui signifie qu'on suppose que tous les VI empruntent les VG et que tous les VOM empruntent la VR2+. L'équation 6.2 permet donc d'obtenir la proportion en VOM par la donnée de leur occupation moyenne et de la

proportion en covoitureurs. La figure 6.17 offre une représentation graphique de l'évolution de la proportion en VOM suivant ces deux paramètres.

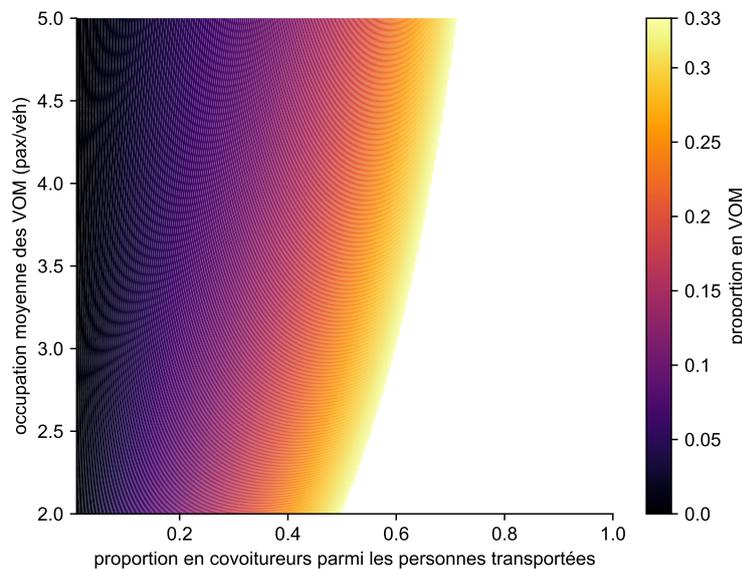


FIGURE 6.17 – Évolution de la proportion en VOM en fonction de l'occupation moyenne des VOM et de la proportion en covoitureurs

Puisqu'on connaît maintenant le lien entre les principales variables, on peut déterminer, pour une situation prospective donnée par un couple $(\omega ; \bar{\rho}_{VOM})$, le nouveau nombre de véhicules par rapport à la situation de référence à partir de l'équation 6.1. Cette situation est définie par un nombre de véhicules $N^{réf}$ et une occupation moyenne $\bar{\rho}^{réf}$. Le nombre de passagers restant constant, un produit en croix donne que le nouveau nombre de véhicules est $\frac{\bar{\rho}^{réf}}{\bar{\rho}} N^{réf}$. En conséquence, puisque définir la demande en trafic à chaque période de six minutes revient à définir le nombre total de véhicules voulant s'écouler pendant cette période, la nouvelle demande en trafic est elle aussi obtenue en multipliant celle de référence par le coefficient $\frac{\bar{\rho}^{réf}}{\bar{\rho}}$.

Une dernière hypothèse est prise, celle de fixer l'occupation moyenne des VOM à 2 pax/véh malgré l'augmentation de la proportion en covoitureurs. Il s'agit de l'occupation la plus basse, ce qui permet alors de se placer dans la situation la plus défavorable en termes de report modal. Il suffit donc uniquement de connaître ω pour définir une situation prospective donnée.

Il reste finalement à déterminer le nombre total de personnes, ce qui revient à déterminer l'occupation moyenne de référence $\bar{\rho}^{réf}$. En France, en période de pointe du matin, elle varie, depuis 2019, entre 1,1 et 1,4 pax/véh (Brutel et Pages, 2021 ; Ecov, 2023 ; Lezec et Perez, 2023 ; Vinci Autoroutes, 2023). Toujours dans la logique de s'appuyer sur une situation défavorable au report modal, on opte pour une valeur de référence $\bar{\rho}^{réf} = 1,1$ pax/véh. Par l'équation 6.1, on en déduit $\omega^{réf} = 19\%$. L'augmentation de ω au fil des situations prospectives doit être contenue de sorte que la proportion en VOM ne dépasse pas 33 %, ce qui correspond à une proportion en covoitureurs de 50 %. Ainsi, pour définir les différentes situations prospectives, on divise l'intervalle [19 % ; 50 %] en quatre parties, ce qui permet d'aboutir aux cinq situations proposées dans le tableau 6.8.

Proportion en covoitureurs ω (%)	Occupation moyenne correspondante $\bar{\rho}$ (pax/véh)	Proportion en VOM correspondante α (%)
19	1,1	10
27	1,16	16
34	1,2	20
42	1,27	27
50	1,33	33

TABLEAU 6.8 – Correspondances, pour les cinq situations prospectives simulées, entre proportion en covoitureurs, occupation moyenne de l'ensemble des véhicules et proportion en VOM, obtenues à partir des équations 6.1 et 6.2

6.2.2.3 Résultats pour le système simulé

La figure 6.18 montre l'évolution de la différence des retards moyens par mode suivant l'augmentation de la proportion en covoitureurs et suivant la VLA. On remarque que les gains, pour une proportion donnée, sont relativement similaires quelle que soit la VLA. Ces gains augmentent avec la proportion en covoitureurs jusqu'à ce que cette dernière atteigne 42 %. Au-delà, on comprend que la diminution globale du nombre de véhicules fait tendre les conditions de trafic vers la fluidité, donc que les gains induits par la VR2+ s'estompent pour les covoitureurs. Le système reste cependant crédible pour toutes les configurations étudiées.

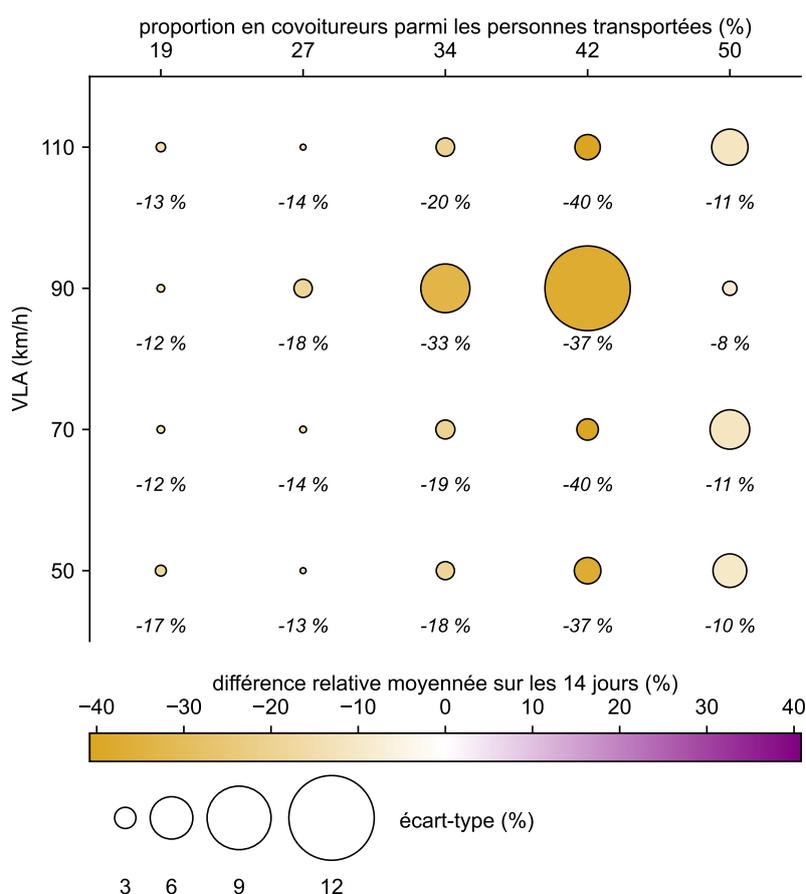


FIGURE 6.18 – Différence relative des retards moyens des VOM par rapport à ceux des VI, suivant la proportion en covoitureurs

La figure 6.15 (resp. 6.16) montre l'évolution de la différence des retards des VOM (resp. VI) par rapport à la situation d'avant-projet suivant l'augmentation de la proportion en

covoitureurs et suivant la VLA. Comme pour l'étude générique, les variations sont les mêmes pour les VOM comme pour les VI. On remarque que la différence par rapport à la situation d'avant-projet diminue avec l'augmentation de la proportion en covoitureurs. Pour des proportions plus élevées que celle de référence, la différence est sensiblement la même quelle que soit la VLA, sauf dans le cas où elle vaut 90 km/h. La baisse est, pour des raisons qu'il reste à examiner, en effet plus accentuée. Les VOM et les VI gagnant tous du temps par rapport à la situation d'avant-projet, le cas $\omega = 50\%$ n'assure pas la pertinence du déploiement. En revanche, les cas où $\omega = 42\%$ et où la VLA est de 110 km/h ou de 70 km/h assurent cette pertinence et donc, en conséquence des résultats sur la crédibilité, la performance de la VR2+.

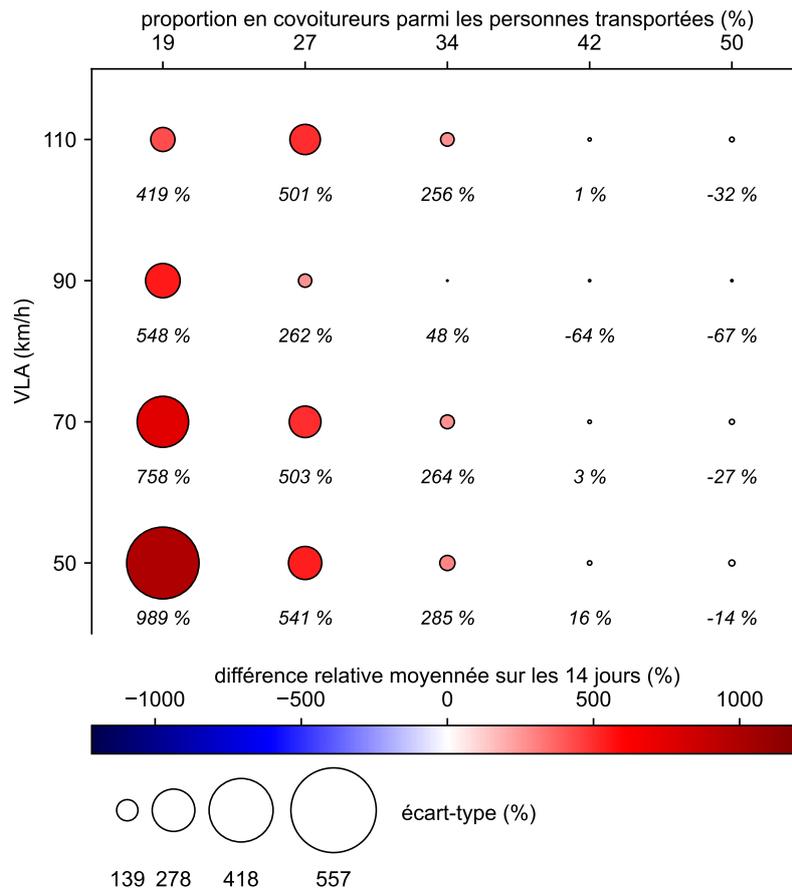


FIGURE 6.19 – Différence relative des retards moyens des VOM par rapport à la situation de référence, suivant la proportion en covoitureurs

Pour conclure, l'étude de ces situations prospectives montre que la performance de la VR2+ peut être obtenue par une augmentation de la proportion en covoitureurs. Dans les cas défavorables, dans le sens où l'occupation des VOM est minimale et que l'occupation moyenne des véhicules en situation de référence est faible, étudiés ici, l'atteinte de cette performance suppose cependant de doubler cette proportion. Cela doit de plus se faire sur un horizon temporel court, sans quoi la notion de pertinence, qui suppose une comparaison à la situation d'avant-projet, deviendrait caduque. D'autres scénarios, plus optimistes et peut-être plus réalistes, devraient être étudiés en complément, comme l'impact d'une augmentation du nombre de personnes transportées ou bien celle d'une augmentation de l'occupation moyenne des VOM.

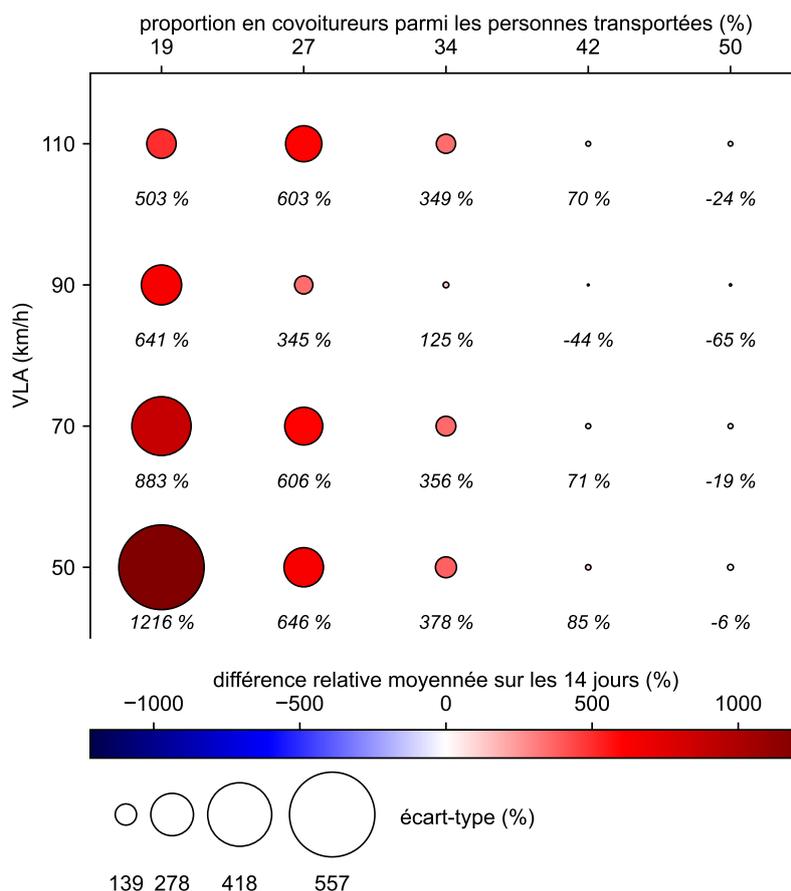


FIGURE 6.20 – Différence relative des retards moyens des VI par rapport à la situation de référence, suivant la proportion en covoitureurs

6.3 Conclusion du chapitre

L'objectif de ce chapitre était d'abord d'évaluer la performance tactique d'une VR2+, reproduite en simulation microscopique à partir de données réelles récoltées sur une VSA au sud de Lyon.

Cette évaluation est réalisée en appui du protocole développé dans le chapitre 5. Elle montre d'abord que l'AVLA à des valeurs restrictives, c'est-à-dire inférieures à 70 km/h, induit, pour une modalité d'activation donnée, un allongement considérable des retards, quelle que soit la proportion en VOM. Ce constat a servi de base pour montrer qu'un tel AVLA ne permet alors pas d'assurer un déploiement crédible et pertinent, donc performant. En cela, l'évaluation permet de confirmer, mais surtout de généraliser à toute configuration, la hausse des retards avec la baisse de la VLA, constatée par [Hans *et al.* \(2021\)](#) pour les quelques configurations particulières que ces auteurs avaient dû retenir.

L'évaluation montre aussi que la modalité d'activation adaptative qui a été développée dans la partie 5.2.2.2 ne permet pas d'obtenir de meilleures performances que celles des modalités statiques. Au sujet des modalités statiques, les performances obtenues pour une activation permanente et celles pour une activation où les horaires d'ouverture de la VR2+ sont calés sur l'heure moyenne d'apparition et de disparition de la congestion sont sensiblement similaires.

Enfin, le protocole d'évaluation a été adapté à un scénario de trafic à visée prospective. Cette visée est prospective dans la mesure où ce scénario cherche à décrire l'évolution de la demande en trafic à plus ou moins court terme en supposant que le nombre de personnes transportées reste le même et que parmi elles, le nombre de covoitureurs augmente au fur

et à mesure des configurations étudiées. Ce scénario traduit une situation défavorable au report modal, dès lors que l'occupation des VOM est fixée à 2 pax/véh, soit le minimum possible, et que l'occupation moyenne de référence de tous les véhicules est fixée à 1,1 pax/véh. En s'attachant uniquement à la modalité MSPr, on a alors montré qu'il fallait au moins doubler, et ceci à court terme, la proportion en covoitureurs par rapport à la situation d'avant-projet afin que la VR2+ soit tactiquement performante. Des scénarios plus réalistes devraient induire un nombre moindre de néo-covoitureurs, donc plus facile à atteindre à court terme, pour assurer cette performance.

Conclusion

Principaux résultats

Dans le contexte de la promotion des mobilités quotidiennes partagées sur le territoire français, le développement du covoiturage courte distance est au cœur des enjeux techniques et politiques. La nouvelle législation vise alors à la mise en œuvre quantitative et qualitative d'offres de services de covoiturage, mais aussi à un usage différent des infrastructures autoroutières existantes via les VR2+. Leur déploiement a l'ambition de garantir des temps de parcours compétitifs aux covoitureurs afin d'enclencher, à plus long terme, un report modal. Cette garantie dépend des conditions de trafic, elle est donc le seul incitatif à ce report modal, c'est-à-dire la seule variable permettant de rendre compte de la performance tactique du déploiement, qui soit quantifiable par les outils de la théorie du trafic. Les objectifs de la thèse étaient alors :

- de compléter et de développer des méthodes génériques d'étude d'opportunité et d'évaluation de la performance tactique des VR2+ déployées sur les autoroutes périurbaines, dans le contexte opérationnel français;
- d'initier les travaux consistant à mettre en évidence la chute de capacité au droit des interfaces des VR2+, afin de mieux quantifier les temps de parcours des véhicules à occupation multiple (VOM) et des véhicules individuels (VI);
- de proposer une méthode de comparaison du bon fonctionnement des outils de simulation dynamique microscopique, très utilisés dans la recherche et par les bureaux d'étude lorsqu'il s'agit de modéliser l'impact d'une VR2+ sur la circulation.

La partie I a d'abord posé le contexte opérationnel et scientifique. Le chapitre 1, à partir notamment d'entretiens avec des experts de la mobilité et des gestionnaires de voirie, a permis de mettre en évidence les enjeux du déploiement des VR2+ sur le territoire. Deux spécificités nationales ressortent, le fait d'imposer un seuil de vitesse limite autorisée (VLA) pour des raisons réglementaires liées à la sécurité routière, ainsi que la possibilité d'activer la VR2+ de manière statique ou adaptative. Le chapitre 2 a ensuite décrit les différents outils empiriques et de modélisation utilisés dans cette thèse afin de construire les méthodes développées.

La partie II a par la suite présenté les phénomènes microscopiques de trafic ayant lieu aux trois types d'interfaces : en amont de la VR2+, en aval de la VR2+ et au droit des bretelles d'entrée ou de sortie intermédiaires. Le fonctionnement agrégé de ces interfaces rappelle alors celui des zones d'entrecroisement, qui s'appuie sur celui des divergents et des convergents.

Une étude préalable de comparaison des outils de simulation microscopique quant à la reproduction du fonctionnement de ces discontinuités est présentée dans le chapitre 3. L'évaluation de la bonne reproduction est quantifiée par la chute de capacité et, pour les convergents, aussi par le partage de l'offre. Une méthode a été proposée puis appliquée à trois simulateurs différents, SymuVia, Aimsun et SUMO. Les paramètres des simulateurs sont

ceux par défaut, sauf pour ceux définissant l'écoulement du trafic afin que la comparaison se fasse sur une base commune. Aucun de ces simulateurs ne reproduit de chute de capacité en amont d'un divergent ponctuel, contrairement à ce qui est décrit dans la littérature. Quant aux convergents, SymuVia et Aimsun font état d'une chute de capacité et d'un partage égal de l'offre entre les voies amont, au contraire de SUMO.

Ensuite, le chapitre 4 a permis d'adapter le modèle analytique de zone d'entrecroisement de Marczak (2014) pour décrire le fonctionnement de l'interface amont d'une VR2+. Ce modèle, ainsi que sa confrontation à la simulation des conditions de trafic au droit de cette interface, montrent la validité de l'hypothèse selon laquelle l'entrecroisement des flux de VOM et de VI engendre une chute de capacité. Cependant, avec une chute de capacité comprise entre 20 et 50 % dans le cas classique d'une VR2+ et de deux VG, alors que celles mesurées au droit des discontinuités autoroutières sont au plus de 30 %, il est possible que le modèle analytique développé dans cette thèse surestime cette chute.

Sur cette base, on élargit la modélisation de la dynamique de la congestion proposée par Hans et Damas (2019), à partir des travaux de Menendez et Daganzo (2007) et de Daganzo et Cassidy (2008). Le domaine d'emploi alors proposé ne s'intéressait qu'à une configuration idéale de l'offre et de la demande, induisant que la seule tête de bouchon était située en aval des VG. Une généralisation aux autres configurations a permis de montrer que, suivant l'objectif opérationnel, d'autres domaines de fonctionnement, notamment ceux induisant une congestion en amont, sont *a priori* compatibles avec la performance de la VR2+. À partir de cette description des domaines de fonctionnement, un modèle analytique d'écoulement du trafic, dans le cas simple d'une congestion de demande, a été élaboré, à partir duquel des indicateurs opérationnels génériques que sont la longueur maximale de file d'attente et le temps total perdu par mode ont été calculés. Cet outil peut donc être utilisé afin de déterminer l'opportunité d'un déploiement de VR2+. Il complète alors celui de de Wissocq *et al.* (2021b), qui s'appuyait uniquement sur le domaine d'emploi.

Enfin, la partie III a permis d'aller au-delà de la simple étude d'opportunité en proposant et en mettant en œuvre une méthode d'évaluation de la performance tactique. Le chapitre 5 a développé cette méthode à visée générique. Cette généralité se trouve dans les trois dimensions qui la caractérisent : la proportion en VOM au moment du déploiement, et, suivant les spécificités nationales relevées par le chapitre 1, la VLA et la modalité d'activation et de désactivation. 84 configurations, simulées pour 14 périodes de pointe du matin, sont alors considérées. L'évaluation s'attache à déterminer si les VOM gagnent du temps à la fois par rapport aux VI et par rapport à la situation d'avant-projet, ce qui assure la performance tactique. Elle a été appliquée, dans le chapitre 6, au cas de l'autoroute A7 au sud de Lyon, reproduit en simulation dynamique microscopique avec SymuVia.

L'analyse de ce cas confirme que le passage, lors de l'activation de la VR2+, de la VLA nominale de 110 km/h à un seuil très restrictif de VLA, comme 70 ou 50 km/h, est absolument nuisible pour la performance. Les retards des convoituteurs peuvent en effet être jusqu'à 20 fois supérieurs à ceux de la situation d'avant-projet. Quant aux modalités d'activation et de désactivation, il n'y a pas de différence notable entre une modalité statique permanente ou bien statique et dont les horaires d'activation coïncident avec la période congestionnée constatée en situation d'avant-projet. Une modalité s'adaptant aux conditions de trafic, lorsqu'elle est déployée pour des configurations pertinentes, ne se distingue d'ailleurs pas, en termes de performance, par rapport aux modalités statiques.

De manière générale, les configurations assurant la performance sont obtenues pour de très hautes proportions en VOM, dont l'atteinte au moment du déploiement est utopique. Ainsi, un scénario prospectif exploratoire a été proposé, visant à décrire une situation à court voire moyen terme après le déploiement. On a supposé une hausse du nombre de convoitu-

reurs ainsi qu'un nombre de passagers constants, ce qui induit une baisse de la demande en trafic. On a alors montré qu'il fallait au moins doubler la proportion en covoitureurs, par rapport à la situation de référence, afin de garantir la performance de la VR2+.

Perspectives

Les travaux de la thèse peuvent se poursuivre principalement selon deux axes. Le premier s'attache aux problématiques liées à l'impact du déploiement d'une VR2+ sur l'écoulement. Il s'agit principalement d'enrichir la modélisation analytique :

- en affinant la modélisation de l'interface amont à partir de celle des convergents multivoies proposée par [Leclercq et al. \(2016b\)](#). L'enjeu est surtout de vérifier si cette augmentation de la précision dans la résolution permet effectivement d'apprécier une chute de capacité plus réaliste que celle liée au modèle développé dans cette thèse ;
- en développant un modèle pour l'interface aval, afin de mieux comprendre l'effet de l'agrégation des comportements des véhicules entre la fin de la VR2+ et la restriction de capacité aval sur le trafic. Cela permettrait d'ailleurs de quantifier l'effet de lissage ([Menendez et Daganzo, 2007](#) ; [Cassidy et al., 2010](#)). Invoquant des changements de voie à la fois obligatoires (CVO) et discrétionnaires (CVD), l'adaptation du modèle de [Leclercq et al. \(2016b\)](#), là encore, paraît la plus adéquate ;
- en développant un modèle pour les interfaces aux discontinuités, c'est-à-dire au droit des éventuelles bretelles de sortie et d'entrée intermédiaires. Cette étude permettrait de quantifier l'effet des CVO des VOM pour entrer ou sortir de la VR2+, vus comme des mouvements de cisaillement, sur l'écoulement du trafic. En corollaire, cela permettrait de prévoir les retards additionnels, pour les VOM, induits par ces manœuvres ;
- en confrontant impérativement les modélisations analytiques résultantes avec des données de terrain, notamment individuelles. Les comportements d'insertion, comme on l'a vu dans la partie II, sont en effet variables d'un véhicule à l'autre, que ce soit au niveau de la position d'insertion ou du temps qui sépare deux insertions. Cette variabilité est incorporée dans les modèles mais doit être calée sur les observations du terrain. Par exemple, le modèle actuel pour l'interface amont suppose que les véhicules réalisent leur manœuvre de CVO avec une probabilité uniformément distribuée dans une zone fixe en amont, ce qui est une hypothèse raisonnable, mais aucune vérification de cette hypothèse n'a pu être effectuée, faute de données. Pour corriger ceci, on pense ainsi à la récolte de trajectoires de véhicules via des enregistrements vidéo. Les données de l'expérience *I-24 MOTION* ([Gloudemans et al., 2023](#)), aux États-Unis, pourraient être utilisées au moins pour l'étude des interfaces aux bretelles. Afin ensuite de valider les modèles analytiques développés, on pense aussi à la récolte de données boucle, si possible voie par voie, en aval des interfaces.

L'objectif final d'une telle modélisation à visée macroscopique serait d'aboutir à un outil complet, générique et validé d'aide à la décision. Il permettrait d'éviter le recours, souvent systématique et parfois réalisé sans recul, à la simulation dynamique pour vérifier l'opportunité d'un déploiement de VR2+.

Le second axe propose de passer de l'échelle tactique, décrivant le trafic à court terme, à l'échelle stratégique, décrivant la modification de la demande en trafic à long terme, ceci dans l'objectif d'évaluer le report modal vers la mobilité partagée. Il s'agit d'étudier l'impact du déploiement d'une VR2+ sur le système de mobilités et sur la synergie avec l'évolution de ce système. Le déploiement d'une VR2+ n'est en réalité qu'une partie de ce système. Pour ce faire, on propose l'approche suivante :

- compléter les modèles multimodaux existants – voir par exemple les travaux de Cortina (2023) – relatifs aux mobilités du quotidien entre une ville-centre et son aire urbaine d’attraction. Il s’agit de proposer, pour se rendre en ville, à chaque individu le choix entre utiliser les transports en commun, utiliser l’autoroute en prenant la VR2+, utiliser l’autoroute en prenant les VG, ou passer par le réseau routier parallèle urbain qu’on peut modéliser par un diagramme fondamental macroscopique (MFD¹) (Mariotte, 2018);
- évaluer les coûts généralisés des usagers pour chacun de ces choix, qui peuvent entre autres intégrer le temps de parcours – connu, à partir de la modélisation résultant du premier axe, pour les parcours sur les VG et sur la VR2+ –, le coût du déplacement en véhicule particulier, la tarification des transports en commun, la propension à accepter d’être passager d’un VOM lorsqu’on ne connaît pas le conducteur, le temps d’attente (Wang et al., 2019 ; Zhong et al., 2020 ; Le Goff et al., 2022);
- en déduire l’évaluation multimodale de l’ensemble du système, ce que l’on peut quantifier par le nombre de personnes utilisant chaque mode, via le *passenger MFD* (Chiabaut, 2015). On peut aussi en déduire une évaluation agrégée des émissions de polluants, l’objectif du report modal étant de les diminuer, à l’aide du *emission MFD* (Barmpanakis et al., 2021). Au sein de ce système, la contribution de la VR2+ à ces évaluations est, dans la lignée des travaux de la thèse, une part intéressante à examiner;
- étudier plusieurs scénarios, en continuant d’avoir un œil attentif à la contribution de la VR2+, de gestion :
 - de la demande en déplacements : passage d’une VR2+ à une VR3+, développement de l’intermodalité, influence des incitations financières pour l’utilisation de modes alternatifs au véhicule individuel, influence de mesures d’organisation du travail comme le télétravail, ...;
 - de l’offre en mobilités partagées : organisation et tarification des transports en commun et des lignes de covoiturage, récupération des usagers et temps de rupture de charge induit sur les aires multimodales, influence de la localisation de ces aires multimodales, ...;
- identifier, si possible, un territoire d’étude sur lequel adapter cette modélisation. Au vu des démarches qu’elles entreprennent depuis le début des années 2020, les métropoles lyonnaise et grenobloise sont en ce sens des cas qu’il serait intéressant de traiter.

Il est certainement trop tôt pour l’étudier, mais il serait très intéressant de modéliser un possible impact indirect et structurant, à très long terme, du report modal : celui sur l’étalement périurbain et l’évolution de la forme spatiale des villes, donc de leur organisation. Ce potentiel impact a déjà été identifié au sujet du déploiement futur des véhicules autonomes et connectés du fait de la diminution de la congestion urbaine et de l’augmentation des distances moyennes parcourues, par trajet, des usagers (Meyer et al., 2017 ; Medina Tapia et Robusté, 2019). Ces changements sont aussi ceux attendus avec le report modal vers les mobilités quotidiennes partagées autour d’une ville-centre.

Ces deux axes de recherche ne seront, sans doute, pas explorés avant que les futures orientations nationales autour du développement du covoiturage courte distance n’aient été prises, d’ici la fin 2024. Ils représentent, à nos yeux, les pistes à explorer au niveau des VR2+ afin d’accompagner le développement de la pratique pour l’horizon des prochaines décennies.

1. pour le terme anglais *macroscopic fundamental diagram*

Bibliographie

- (2019). Loi n°2019-1428 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités. *Journal officiel de la République française* n°0299 du 26 décembre 2019, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000039666574/2020-10-06/>.
- (2020). Arrêté du 24 août 2020 relatif à l'expérimentation d'une signalisation relative aux voies de circulation réservées à certaines catégories de véhicules sur certains axes. *Journal officiel de la République française* n°0211 du 29 août 2020, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000042283775>.
- Abdulrazzaq, L. R., Abdulkareem, M. N., Yazid, M. R. M., Borhan, M. N. et Mahdi, M. S.** (2020). Traffic Congestion: Shift from Private Car to Public Transportation. *Civil Engineering Journal*, 6(8):1547–1554.
- Adam, M.** (2019). *Étude de l'impact de l'implantation d'une voie dynamique réservée aux véhicules à occupation multiple. Modélisation analytique et numérique*. Travail de fin d'études et mémoire de master, École nationale des travaux publics de l'État, Vaulx-en-Velin (France).
- Adeus** (2023). *Évaluation des mesures mises en oeuvre sur la M35 à la mise en service de l'A355. Rapport de synthèse n°1*. Rapport technique, Agence d'urbanisme de Strasbourg Rhin supérieur, Strasbourg (France).
- Alisoltani, N., Leclercq, L. et Zargayouna, M.** (2021). Can dynamic ride-sharing reduce traffic congestion? *Transportation Research Part B: Methodological*, 145:212–246.
- Ancelet, O. et Hans, É.** (2020). *Voies structurantes d'agglomération. Fonctionnement des accès*. Rapport technique, Cerema, Lyon (France). Collection : Références.
- Andersen, G. J. et Sauer, C. W.** (2007). Optical Information for Car Following: The Driving by Visual Angle (DVA) Model. *Human Factors*, 49(5):878–896.
- André, M. et Brutti-Mairesse, E.** (2015). Évaluation de l'impact d'un PDU : problématique de l'émission de polluants atmosphériques. *RTS - Recherche Transports Sécurité*, 2015(02):121–133.
- Artan, Y., Bulan, O., Loce, R. P. et Paul, P.** (2016). Passenger Compartment Violation Detection in HOV/HOT Lanes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(2):395–405.
- Babet, C. et Bouvry, L.** (2021). *Chiffres clés des transports. Édition 2021*. DATALAB - Transport. Ministère de la Transition écologique, Commissariat Général au Développement Durable, Service des données et études statistiques.
- Bacelar, A., Aliaga, F. et Petitjean, P.** (2023). Des capteurs pour compter les covoitureurs : retour sur les essais en cours avec le Cerema. Cerema, <https://www.cerema.fr/fr/actualites/capteurs-compter-covoitureurs->

[retour-essais-cours-cerema](#), 19 juin.

- Ballet, J., Bazin, D. et Mahieu, F.-R.** (2020). A policy framework for social sustainability: Social cohesion, equity and safety. *Sustainable Development*, 28(5):1388–1394.
- Ballet, J.-C. et Clavel, R.** (2007). *Le covoiturage en France et en Europe. État des lieux et perspectives*. Rapport technique, Certu, Lyon (France). Collection : Rapports d'étude.
- Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A. et Sugiyama, Y.** (1995). Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. *Physical Review E*, 51(2):1035–1042.
- Bar-Gera, H. et Ahn, S.** (2010). Empirical macroscopic evaluation of freeway merge-ratios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(4):457–470.
- Barceló, J.**, éd. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation*. International Series in Operations Research & Management Science. Springer-Verlag, New York (États-Unis).
- Barceló, J.** (2014). Issue 5 - Appropriate definitions of calibration and validation. Dans M. Brackstone et V. Punzo, édés., *Traffic Simulation: Case for Guidelines*, vol. JRC885, pp. 55–58. Publications Office of the European Union, Joint Reserch Centre.
- Barceló, J. et Casas, J.** (2005). Dynamic Network Simulation with AIMSUN. Dans R. Kitamura et M. Kuwahara, édés., *Simulation Approaches in Transportation Analysis: Recent Advances and Challenges*, Operations Research/Computer Science Interfaces Series, pp. 57–98. Springer US, Boston (États-Unis).
- Barpounakis, E., Montesinos-Ferrer, M., Gonzales, E. J. et Geroliminis, N.** (2021). Empirical investigation of the emission-macroscopic fundamental diagram. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 101:103090.
- Baude, M., Baudry, M., Dussud, F.-X., Duvernoy, J., Bultheel, C. et Vailles, C.** (2020). *Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde. Édition 2020*. DATALAB - Climat. Ministère de la Transition écologique et solidaire, Commissariat Général au Développement Durable, Service des données et études statistiques.
- Bertini, R. L. et Leal, M. T.** (2005). Empirical Study of Traffic Features at a Freeway Lane Drop. *Journal of Transportation Engineering*, 131(6):397–407.
- Besançon, Y.** (2018). Les grandes fissures du modèle libéral-productiviste à l'aube du XXI^e siècle. *Idées économiques et sociales*, 192(2):46–52.
- Bhandarkar, S.** (2013). Vehicular Pollution, Their Effect on Human Health and Mitigation Measures. *Vehicle Engineering*, 1(2):33–40.
- Bigot, R. et Hoibian, S.** (2014). L'évolution du bien-être en France depuis 25 ans : un bilan mitigé, une augmentation des inégalités. *L'Année sociologique*, 64(2):331–358.
- Billheimer, J. W.** (1978). The Santa Monica freeway diamond lanes: evaluation overview. *Transportation Research Record*, (663):9–16.
- Blume, K. L.** (1998). Implementation of a dynamic HOV lane. Dans C. L. Dudek, éd., *Compendium: Graduate Student Papers on Advanced Surface Transportation Systems 1998*, SWUTC/98/72840-00003-3, pp. 11–54. Southwest Region University Transportation Center, Texas Transportation Institute, College Station (États-Unis).
- Boriboonsomsin, K. et Barth, M.** (2007). Evaluating Air Quality Benefits of Freeway High-Occupancy Vehicle Lanes in Southern California. *Transportation Research Record*, 2011(1):137–147.

- Boriboonsomsin, K. et Barth, M.** (2008). Impacts of freeway high-occupancy vehicle lane configuration on vehicle emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13(2):112–125.
- Boukhellouf, M., Buisson, C. et Chiabaut, N.** (2023). Merging and diverging operations: benchmark of three European microscopic simulation tools and comparison with analytical formulations. *European Transport Research Review*, 15(1):20.
- Boukhellouf, M., Chiabaut, N. et Buisson, C.** (2022). High-occupancy vehicle lanes: modeling the upstream interface capacity. Dans *hEART 2022, 10e symposium du European Association for Research in Transportation*, pp. 1–7. Louvain (Belgique).
- Bourcier, S. et Courbe, D.** (2023). « Mesurer la dynamique du covoiturage en Pays de la Loire ». Rendez-vous Mobilités du Cerema : « Covoiturage : quelle stratégie pour massifier la pratique ? », 23 juin.
- Brackstone, M. et McDonald, M.** (1999). Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4):181–196.
- Brahmi, L., Fumat, V. et Trévien, C.** (2022). *Se déplacer en voiture : seul, à plusieurs ou en covoiturage ?* DATALAB Essentiel. Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Commissariat Général au Développement Durable, Service des données et études statistiques.
- Brockfeld, E., Kühne, R. D., Skabardonis, A. et Wagner, P.** (2003). Toward Benchmarking of Microscopic Traffic Flow Models. *Transportation Research Record*, 1852(1):124–129.
- Brockfeld, E., Kühne, R. D. et Wagner, P.** (2004). Calibration and Validation of Microscopic Traffic Flow Models. *Transportation Research Record*, 1876(1):62–70.
- Broto, A.** (2014). Les enjeux des mobilités du quotidien pour de grandes aires urbaines. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 75(3):65–73.
- Brown, M.** (1972). Low density traffic streams. *Advances in Applied Probability*, 4(1):177–192.
- Brundtland Harlem, G.** (1988). *Notre avenir à tous. Rapport Brundtland*. Organisation des Nations Unies, Commission mondiale sur l'environnement et le développement.
- Brutel, C. et Pages, J.** (2021). *La voiture reste majoritaire pour les déplacements domicile-travail, même pour de courtes distances*. Rapport technique 1835, Institut national de la statistique et des études économiques.
- Buisson, C.** (2014). *Mesure et Modélisation de la Congestion et de la Pollution. Impact des régulations des autoroutes périurbaines sur la congestion, la pollution et la sécurité routière*. Rapport technique 0.4, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.
- Buisson, C. et Lesort, J.-B.** (2010). *Comprendre le trafic routier. Méthodes et calculs*. Éditions du Certu, Vaulx-en-Velin (France). Collection : Références, n°96.
- Buisson, C. et Pélissier, S.** (2022). « Impacts environnementaux des véhicules thermiques, électriques, autonomes ou automatisés : comment les quantifier ? ». 49e Congrès ATEC ITS France, Montrouge (France), 19 janvier.
- Carlson, R. C., Papamichail, I. et Papageorgiou, M.** (2011). Local Feedback-Based Mainstream Traffic Flow Control on Motorways Using Variable Speed Limits. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(4):1261–1276.

- Carlson, R. C., Papamichail, I., Papageorgiou, M. et Messmer, A.** (2010). Optimal Motorway Traffic Flow Control Involving Variable Speed Limits and Ramp Metering. *Transportation Science*, 44(2):238–253.
- Cassidy, M. J. et Ahn, S.** (2005). Driver Turn-Taking Behavior in Congested Freeway Merges. *Transportation Research Record*, 1934(1):140–147.
- Cassidy, M. J., Jang, K. et Daganzo, C. F.** (2010). The smoothing effect of carpool lanes on freeway bottlenecks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(2):65–75.
- Cassidy, M. J. et Rudjanakanoknad, J.** (2005). Increasing the capacity of an isolated merge by metering its on-ramp. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(10):896–913.
- Chandler, R. E., Herman, R. et Montroll, E. W.** (1958). Traffic Dynamics: Studies in Car Following. *Operations Research*, 6(2):165–184.
- Chapron, G., Marano, E. et Saroli, C.** (2013). *Le covoiturage : des pistes pour favoriser son développement*. Rapport technique, Certu, Lyon (France). Collection : Dossiers.
- Chen, D. et Ahn, S.** (2018). Capacity-drop at extended bottlenecks: Merge, diverge, and weave. *Transportation Research Part B: Methodological*, 108:1–20.
- Chen, D., Ahn, S., Laval, J. et Zheng, Z.** (2014). On the periodicity of traffic oscillations and capacity drop: The role of driver characteristics. *Transportation Research Part B: Methodological*, 59:117–136.
- Chiabaut, N.** (2015). Evaluation of a multimodal urban arterial: The passenger macroscopic fundamental diagram. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81:410–420.
- Chiabaut, N., Buisson, C. et Leclercq, L.** (2009). Fundamental Diagram Estimation Through Passing Rate Measurements in Congestion. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10(2):355–359.
- Chiabaut, N., Leclercq, L. et Buisson, C.** (2010). From heterogeneous drivers to macroscopic patterns in congestion. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(2):299–308.
- Chowdhury, S. et Ceder, A. A.** (2016). Users' willingness to ride an integrated public-transport service: A literature review. *Transport Policy*, 48:183–195.
- Clairais, A.** (2022). *Expertise des modalités d'activation de la VR2+ et RDV sur A7 Ternay/St-Fons (projet)*. Rapport technique, Cerema, Bron (France).
- Clairais, A., Pelé, N. et Ancelet, O.** (2020). « VR2+ A7. Étude Analytique ». Atelier « Voies Réservées », Cerema Centre-Est et DIR Centre-Est, 26 novembre.
- Cohen, M. C., Jacquillat, A., Ratzon, A. et Sasson, R.** (2022). The impact of high-occupancy vehicle lanes on carpooling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 165:186–206.
- Cortina, M.** (2023). *Fostering synergy between Public Transportation and Autonomous Mobility on Demand: the prospects of regulation*. Thèse de doctorat, École nationale des travaux publics de l'État, Vaulx-en-Velin (France).
- Cowan, R. J.** (1975). Useful headway models. *Transportation Research*, 9(6):371–375.
- Crozet, Y.** (2005). Le temps et les transports de voyageurs. Dans *Table Ronde 127 : Le temps et les transports*, pp. 31–69.
- Crozet, Y.** (2022). Le covoiturage courte distance à la peine. *Transports, Infrastructures &*

- Mobilité*, (535):31–34.
- Cusset, P.-Y.** (2023). Transition écologique, transition juste ? *Constructif*, 64(1):45–50.
- Daamen, W., Loot, M. et Hoogendoorn, S. P.** (2010). Empirical Analysis of Merging Behavior at Freeway On-Ramp. *Transportation Research Record*, 2188(1):108–118.
- Daganzo, C. F.** (1995). The cell transmission model, part II: Network traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 29(2):79–93.
- Daganzo, C. F.** (2005). A variational formulation of kinematic waves: Basic theory and complex boundary conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(2):187–196.
- Daganzo, C. F. et Cassidy, M. J.** (2008). Effects of high occupancy vehicle lanes on freeway congestion. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(10):861–872.
- Dahlgren, J.** (1998). High occupancy vehicle lanes: not always more effective than general purpose lanes. *Transportation Research Part A*, 32(2):99–115.
- Dahlgren, J.** (2002). High-occupancy/toll lanes: where should they be implemented? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(3):239–255.
- Davis, L. C.** (2003). Modifications of the optimal velocity traffic model to include delay due to driver reaction time. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 319:557–567.
- de Palma, A., Vosough, S. et Liao, F.** (2022). An overview of effects of COVID-19 on mobility and lifestyle: 18 months since the outbreak. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 159:372–397.
- de Wissocq, M., Ancelet, O., Balmefrezol, P., Glasson, P., Huillet, J., Luzerne, M., Muller-Perriand, K., Pelé, N. et Williams, R.** (2021a). *Voies réservées – Convention citoyenne pour le climat. Expérimentations de voies réservées au covoiturage et à certaines catégories de véhicules sur voies structurantes d'agglomération. Fiche n°01 : Opportunité et pré-faisabilité.* Rapport technique, Cerema, Lyon (France). Collection : Connaissances.
- de Wissocq, M., Ancelet, O., Glasson, P., Huillet, J., Luzerne, M., Pelé, N., Williams, R., Tissandier, S., Bacelar, A. et Lemoine, D.** (2021b). *Voies réservées – Convention citoyenne pour le climat. Expérimentations de voies réservées au covoiturage et à certaines catégories de véhicules sur voies structurantes d'agglomération. Fiche n°02 : Conception - Scénario 1 : Voie réservée à horaires d'ouverture prédéfinis par mobilisation de la voie de gauche.* Rapport technique, Cerema, Lyon (France). Collection : Connaissances.
- de Wissocq, M., Ancelet, O., Glasson, P., Huillet, J., Luzerne, M., Pelé, N., Williams, R., Tissandier, S., Bacelar, A., Lemoine, D., Aliaga, F., Bugajny, C., Buttignol, V., Clairais, A., Costeseque, G., Cottelle, C., Ditchi, N., Dunez, P., Gossman, I., Horvath, M.-A., Lebre, A., Levilly, B., Miège, B., Moisan, O., Muller-Perriand, K., Nicolleau, K., Petitjean, P., Pot, G., Rivoirard, L., Rosso-Darmet, A., Savalle, D., Subirats, P. et Trouilloud, O.** (2022). *Voies réservées – Convention citoyenne pour le climat. Expérimentations de voies réservées au covoiturage et à certaines catégories de véhicules sur voies structurantes d'agglomération. Fiche n°06 : Évaluation a posteriori.* Rapport technique, Cerema, Lyon (France). Collection : Connaissances.
- Delaunay, T. et Baron-Yellès, N.** (2019). Le service public de covoiturage : vers quelles formes de gouvernance, de régulation et de modèles d'affaires ? *Belgeo, Revue belge de géographie*, (4).

- Delcampe, D.** (2018). *Covoiturage courte et moyenne distance. Retour d'expériences, freins et leviers*. Rapport technique, Cerema, Saint-Médard-en-Jalles (France). Collection : Rapports d'étude.
- Delcampe, D.** (2021). *Fiche covoiturage du quotidien. Lane*. Rapport technique, Cerema, Saint-Médard-en-Jalles (France).
- Delcampe, D.** (2022). *Fiche covoiturage du quotidien. Voie réservée sur A48*. Rapport technique, Cerema, Saint-Médard-en-Jalles (France).
- Derré, I.** (2012). « Covoiturage : lignes dédiées. Quelques expériences étrangères ». Club Déplacements-Transports de la CoTITA Île-de-France, DRIEA Île-de-France, 13 septembre.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.** (2021). Eclipse SUMO - Simulation of Urban MObility. https://github.com/eclipse/sumo/blob/b36f348d9fa5045e7c746007409a12dc26174069/src/microsim/cfmodels/MSCFModel_Krauss.cpp, 23 juillet.
- Domergue, M. et Ebner, P.** (2021). *Le GIEC : 30 ans d'expertise qui éclairent sur le changement climatique*. THÉMA Essentiel - Climat. Ministère de la Transition écologique, Commissariat Général au Développement Durable, Service de la recherche et de l'innovation.
- Domínguez Frejo, J. R., Papamichail, I., Papageorgiou, M. et De Schutter, B.** (2019). Macroscopic modeling of variable speed limits on freeways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 100:15–33.
- Dowling, R., Skabardonis, A., Alexiadis, V., Wunderlich, K., Vasudevan, M. et Wang, P.** (2019). *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software 2019. Update to the 2004 Version*. Rapport technique FHWA-HOP-18-036, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Operations, Washington D.C. (États-Unis).
- Ducouret, J.** (2021). Val-d'Oise. Covoiturage : le projet de suppression d'une voie de l'A15 abandonné par l'État. *La Gazette du Val-d'Oise*. https://actu.fr/societe/val-d-oise-covoiturage-le-projet-de-suppression-d-une-voie-de-l-a15-abandonne-par-l-etat_41326610.html, 24 avril.
- Duffy, L.** (2021). « Voies réservées sur M6 et M7 du Grand Lyon. Observation et évaluation ». Conférence technique territoriale « Covoiturage du quotidien : quelles infrastructures et quels services pour le développer ? », 16 décembre.
- Duret, A.** (2010). *Hétérogénéités du trafic autoroutier. Identification, quantification, modélisation et impact sur l'écoulement*. Thèse de doctorat, École nationale des travaux publics de l'État, Vaulx-en-Velin (France).
- Duret, A., Ahn, S. et Buisson, C.** (2012). Lane flow distribution on a three-lane freeway: General features and the effects of traffic controls. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24:157–167.
- Ecov** (2023). *Agir à l'échelle régionale pour le développement du covoiturage. Guide à l'attention des acteurs de la mobilité*. Rapport technique.
- Eddie, L. C.** (1961). Car-Following and Steady-State Theory for Noncongested Traffic. *Operations Research*, 9(1):66–76.
- Elefteriadou, L., Roess, R. P. et McShane, W. R.** (1995). Probabilistic nature of breakdown at freeway merge junctions. *Transportation Research Record*, (1484).

- Éneau, B., Petiot, O., Reynaud, J.-L., Balmefrezol, P., Goyon-Leroux, V., Kerbellec, È., Larose, S., Luzerne, M., Murard, F. et Reynaud, J.-L.** (2018). *Voies structurantes d'agglomération. Aide à la maîtrise d'ouvrage dans la démarche de programmation*. Rapport technique, Cerema, Bron (France). Collection : Références.
- Erdmann, J.** (2014). Lane-Changing Model in SUMO. Dans *Proceedings of the SUMO2014 Modeling Mobility with Open Data*, vol. 24, pp. 77–88. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Berlin (Allemagne).
- Fauchet, É., Laharotte, P.-A., Bhattacharyya, K. et El Faouzi, N.-E.** (2022). Système de régulation dynamique de vitesse basé sur un contrôleur PID dans un environnement de trafic connecté. Dans *RJCIA'2022 : 20e Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle*. Saint-Étienne (France).
- Faucheux, G.** (2023). Seine-et-Marne. Ligne R : le calvaire continue pour les usagers. *La République de Seine-et-Marne*. https://actu.fr/ile-de-france/melun_77288/seine-et-marne-ligne-r-le-calvaire-continue-pour-les-usagers_58601157.html, 2 avril.
- Fontes, T., Fernandes, P., Rodrigues, H., Bandeira, J. M., Pereira, S. R., Khattak, A. J. et Coelho, M. C.** (2014). Are HOV/eco-lanes a sustainable option to reducing emissions in a medium-sized European city? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 63:93–106.
- Fourquet, J. et Cassely, J.-L.** (2021). *La France sous nos yeux. Économie, paysages, nouveaux modes de vie*. Éditions du Seuil.
- Franco, V., Kousoulidou, M., Muntean, M., Ntziachristos, L., Hausberger, S. et Dilara, P.** (2013). Road vehicle emission factors development: A review. *Atmospheric Environment*, 70:84–97.
- Fritzsche, H.** (1994). A model for traffic simulation. *Traffic Engineering and Control*, 35(5):317–321.
- Fuhs, C. et Obenberger, J.** (2002). Development of High-Occupancy Vehicle Facilities: Review of National Trends. *Transportation Research Record*, 1781(1):1–9.
- Garric, A.** (2022). Dennis Meadows : « Il faut mettre fin à la croissance incontrôlée, le cancer de la société ». *Le Monde*. https://www.lemonde.fr/idees/article/2022/04/08/dennis-meadows-il-faut-mettre-fin-a-la-croissance-incontrolee-le-cancer-de-la-societe_6121114_3232.html, 8 avril.
- Gazis, D. C., Herman, R. et Rothery, R. W.** (1961). Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow. *Operations Research*, 9(4):545–567.
- Georgeault, H.** (2023). « Quelle dynamique suite au lancement du plan national covoiturage ? ». Rendez-vous Mobilités du Cerema : « Covoiturage : quelle stratégie pour massifier la pratique ? », 23 juin.
- Gerlough, D. L. et Huber, M. J.** (1975). *Traffic Flow Theory. A Monograph*. Rapport technique 165, Transportation Research Board, Washington D.C. (États-Unis).
- Gipps, P. G.** (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2):105–111.
- Gipps, P. G.** (1986). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(5):403–414.

- Gitelman, V. et Doveh, E.** (2023). Examining the Safety Impacts of High-Occupancy Vehicle Lanes: International Experience and an Evaluation of First Operation in Israel. *Sustainability*, 15(18):13976.
- Glasson, P.** (2023). « Panorama des voies réservées au covoiturage en France ». Conférence technique territoriale, 25 janvier.
- Glasson, P., Murard, F. et Pelé, N.** (2021). *Projets de gestion dynamique du trafic. Régulation dynamique des vitesses*. Rapport technique, Cerema, Lyon (France). Collection : Références.
- Gludemans, D., Wang, Y., Ji, J., Zachár, G., Barbour, W., Hall, E., Cebelak, M., Smith, L. et Work, D. B.** (2023). I-24 MOTION: An instrument for freeway traffic science. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 155:104311.
- Golob, T. F. et Recker, W. W.** (2004). A method for relating type of crash to traffic flow characteristics on urban freeways. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(1):53–80.
- Grandjean, A.** (2012). La transition écologique : comment ? *Études*, 416(4):439–448.
- Gray, G. E., Harvey, S., Haven, J. et Dillon, W. A.** (1995). Caltrans Interstate 15 reversible high-occupancy lanes: 1994 status. *Transportation Research Record*, 1494:48–58.
- Greenshields, B. D., Bibbins, J. R., Channing, W. S. et Miller, H. H.** (1935). A study of traffic capacity. *Highway Research Board proceedings*, 14.
- Greenshields, B. D., Thompson, J. T., Dickinson, H. C. et Swinton, R. S.** (1934). The photographic method of studying traffic behavior. *Highway Research Board Proceedings*, 13.
- Grumert, E. F., Tapani, A. et Ma, X.** (2018). Characteristics of variable speed limit systems. *European Transport Research Review*, 10(2):21.
- Guensler, R., Elango, V., Guin, A., Hunter, M. et Laval, J.** (2013). *Atlanta I-85 HOV-to-HOT Conversion: Analysis of Vehicle and Person Throughput*. Rapport technique FHWA-GA-13-10-03.
- Guitton, É.** (2022). *Voies réservées sur autoroutes et voies rapides urbaines. Benchmark comparatif entre cas espagnols, anglais et français*. Institut Paris Région.
- Guyader, H., Friman, M. et Olsson, L. E.** (2021). Shared Mobility: Evolving Practices for Sustainability. *Sustainability*, 13(21):14.
- Gómez Patiño, C. M.** (2022). *Variabilité inter-individuelle du comportement longitudinal de véhicules à conduite manuelle ou automatisée : impacts sur la capacité des voies*. Thèse de doctorat, École nationale des travaux publics de l'État, Vaulx-en-Velin (France).
- Hadiuzzaman, M., Qiu, T. Z. et Lu, X.-Y.** (2013). Variable Speed Limit Control Design for Relieving Congestion Caused by Active Bottlenecks. *Journal of Transportation Engineering*, 139(4):358–370.
- Hale, D., Hajbabaie, A., Ma, J., Hu, J., Park, H. et Bared, J.** (2016). Proposed Data-Driven Performance Measures for Comparing and Ranking Traffic Bottlenecks. *Transportation Research Procedia*, 15:483–494.
- Hamdar, S.** (2012). Driver Behavior Modeling. Dans A. Eskandarian, éd., *Handbook of Intelligent Vehicles*, pp. 537–558. Springer, Londres (Royaume-Uni).

- Hans, É.** (2015). *Modélisation des lignes de bus pour la prévision temps réel et la régulation dynamique*. Thèse de doctorat, École nationale des travaux publics de l'État, Vaulx-en-Velin (France).
- Hans, É., Clairais, A. et Ancelet, O.** (2021). *VR2+ sur l'A7 entre Ternay et St-Fons. Phase 2 : Simulation dynamique*. Rapport technique, Cerema Centre-Est, DIR Centre-Est, Neovya.
- Hans, É. et Damas, C.** (2019). *Voies structurantes d'agglomération. Évaluation a priori des voies réservées au covoiturage. Protocoles de validation des études en simulation dynamique à l'usage des maîtres d'ouvrage*. Rapport technique, Cerema, Lyon (France).
- Hasiak, F. et Palmier, P.** (2019). « Le covoiturage pour la mobilité quotidienne. Une estimation du potentiel par l'analyse de l'organisation spatio-temporelle des Activités quotidiennes des individus ». 2e Rencontres Francophones Transport Mobilité, Montréal (Canada), 11 juin.
- Hauer, E.** (2009). Speed and Safety. *Transportation Research Record*, 2103(1):10–17.
- Hawas, Y. E. et Hameed, M. A.** (2009). A multi-stage procedure for validating microscopic traffic simulation models. *Transportation Planning and Technology*, 32(1).
- Hegyi, A. et Hoogendoorn, S.** (2010). Dynamic speed limit control to resolve shock waves on freeways - Field test results of the SPECIALIST algorithm. Dans *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 519–524.
- Hegyi, A., Hoogendoorn, S., Schreuder, M., Stoelhorst, H. et Viti, F.** (2008). SPECIALIST: A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory. Dans *2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 827–832.
- Hegyi, A., Schutter, B. D. et Hellendoorn, J.** (2005). Optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6(1):102–112.
- Henn, V.** (2005). A Wave-Based Resolution Scheme for the Hydrodynamic LWR Traffic Flow Model. Dans S. P. Hoogendoorn, S. Luding, P. H. L. Bovy, M. Schreckenberg et D. E. Wolf, éd., *Traffic and Granular Flow '03*, pp. 105–124. Springer, Berlin, Heidelberg (Allemagne).
- Highways Agency** (2007). *M25 Controlled Motorways Summary Report*. Rapport technique, Guilford (Royaume-Uni).
- Hoogendoorn, S. P., Van Zuylen, H. J., Schreuder, M., Gorte, B. et Vosselman, G.** (2003). Microscopic Traffic Data Collection by Remote Sensing. *Transportation Research Record*, 1855(1):121–128.
- Jang, K., Chung, K., Ragland, D. R. et Chan, C.-Y.** (2009). Safety Performance of High-Occupancy Vehicle (HOV) Facilities: Evaluation of HOV Lane Configurations in California.
- Javid, R. J., Xie, J., Wang, L., Yang, W., Javid, R. J. et Salari, M.** (2021). High-Occupancy Vehicle (HOV) and High-Occupancy Toll (HOT) Lanes. Dans R. Vickerman, éd., *International Encyclopedia of Transportation*, pp. 45–51. Elsevier.
- Jayol, A., Sengelin, D. et Leclercq, L.** (2022). Routes Alternatives with Reduced Emissions: Large-Scale Statistical Analysis of Probe Vehicle Data in Lyon. *Atmosphere*, 13(10):1681.
- Jin, S., Wang, D.-H., Huang, Z.-Y. et Tao, P.-F.** (2011). Visual angle model for car-following theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390(11):1931–1940.
- Kan, X. D., Xiao, L., Liu, H., Wang, M., Schakel, W. J., Lu, X.-Y., van Arem, B., Shladover,**

- S. E. et Ferlis, R. A.** (2019). Cross-Comparison and Calibration of Two Microscopic Traffic Simulation Models for Complex Freeway Corridors with Dedicated Lanes. *Journal of Advanced Transportation*, 2019(1457):1–14.
- Kerner, B., Demir, C., Herrtwich, R., Klenov, S., Rehborn, H., Aleksic, M. et Haug, A.** (2005). Traffic state detection with floating car data in road networks. Dans *2005 IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings*, pp. 44–49.
- Kestemont, B.** (2013). La distribution des richesses naturelles et écologiques. Dans *Proceedings du 1er congrès interdisciplinaire du développement durable*, pp. 61–71. Namur (Belgique).
- Khondaker, B. et Kattan, L.** (2015). Variable speed limit: an overview. *Transportation Letters*, 7(5):264–278.
- Knoop, V. L., Hoogendoorn, S. P. et van Zuylen, H. J.** (2008). Capacity Reduction at Incidents: Empirical Data Collected from a Helicopter. *Transportation Research Record*, 2071(1):19–25.
- Kometani, E. et Sasaki, T.** (1959). A Safety Index for Traffic with Linear Spacing. *Operations Research*, 7(6):704–720.
- Kondyli, A., Duret, A. et Elefteriadou, L.** (2007). Evaluation of CORSIM and AIMSUN for Freeway Merging Segments Under Breakdown Conditions. Dans *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*, 07-2416, pp. 1–25. Washington D.C. (États-Unis).
- Krauß, S.** (1998). *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*. Thèse de doctorat, Université de Cologne, Cologne (Allemagne).
- Kušić, K., Ivanjko, E., Gregurić, M. et Miletić, M.** (2020). An Overview of Reinforcement Learning Methods for Variable Speed Limit Control. *Applied Sciences*, 10(14):4917.
- Kwon, J. et Varaiya, P.** (2008). Effectiveness of California's High Occupancy Vehicle (HOV) system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16:98–115.
- Laigle, L.** (2013). Pour une transition écologique à visée sociétale. *Mouvements*, 75(3):135–142.
- Lapardhaja, S., Jalota, D., Doig, J., Almubarak, A. et Cassidy, M.** (2021). Testing alternative treatments for underused carpool lanes on narrow freeways. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 149:139–149.
- Laurent, É.** (2018). La transition sociale-écologique : récit, institutions et politiques publiques. *Cités*, 76(4):31–40.
- Laurent, É. et Pochet, P.** (2015). La transition ne pourra être qu'écologique et sociale. *Alternatives Économiques*, 2015/12(352):24.
- Laval, J. A.** (2006). Stochastic Processes of Moving Bottlenecks: Approximate Formulas for Highway Capacity. *Transportation Research Record*, 1988:86–91.
- Laval, J. A.** (2009). Effects of geometric design on freeway capacity: Impacts of truck lane restrictions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(6):720–728.
- Laval, J. A.** (2019). *Traffic Flow Theory. Course Notes for CEE 6636*. Georgia Institute of Technology, Atlanta (États-Unis).
- Laval, J. A. et Daganzo, C. F.** (2006). Lane-changing in traffic streams. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(3):251–264.

- Laval, J. A. et Leclercq, L.** (2008). Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(6):511–522.
- Laval, J. A. et Leclercq, L.** (2010). A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1928):4519–4541.
- Lavielle, J.-P.** (2008). *Évolution des rythmes sociaux et étalement de l'heure de pointe*. Travail de fin d'études, École nationale des travaux publics de l'État, Vaulx-en-Velin (France).
- Laville, B.** (2012). Transition écologique, plutôt que développement durable. Entretien avec Dominique Bourg. *Vraiment durable*, 1(1):77–96.
- Le Goff, A., Monchambert, G. et Raux, C.** (2022). Are solo driving commuters ready to switch to carpool? Heterogeneity of preferences in Lyon's urban area. *Transport Policy*, 115:27–39.
- Leclercq, L.** (2009). *Le modèle LWR : théorie, confrontation expérimentale et applications au milieu urbain*. Habilitation à diriger des recherches, Université Claude Bernard Lyon I, Lyon (France).
- Leclercq, L., Knoop, V. L., Marczak, F. et Hoogendoorn, S. P.** (2016a). Capacity drops at merges: New analytical investigations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 62:171–181.
- Leclercq, L., Laval, J. A. et Chiabaut, N.** (2011). Capacity drops at merges: An endogenous model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(9):1302–1313.
- Leclercq, L., Marczak, F., Knoop, V. L. et Hoogendoorn, S. P.** (2016b). Capacity drops at merges: Analytical expressions for multilane freeways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2560):1–9.
- Lee, C., Hellinga, B. et Saccomanno, F.** (2006). Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(3):213–228.
- Lee, G.** (2006). *Modeling gap acceptance at freeway merges*. Travail de fin de master, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (États-Unis).
- Lee, J.-T., Dittberner, R. et Sripathi, H.** (2007). Safety Impacts of Freeway Managed-Lane Strategy: Inside Lane for High-Occupancy Vehicle Use and Right Shoulder Lane as Travel Lane During Peak Periods. *Transportation Research Record*, 2012(1):113–120.
- Lenormand, A.** (2007). Transports - Le conseil général de l'Isère réalise une voie dédiée aux bus sur une autoroute. *Banque des Territoires*, avec l'Agence France-Presse. <https://www.banquedesterritoires.fr/le-conseil-general-de-lisere-realise-une-voie-dediee-aux-bus-sur-une-autoroute>, 3 septembre.
- Lezec, F. et Perez, F.** (2023). *La mobilité locale et longue distance des Français. Enquête nationale sur la mobilité des personnes en 2019*. DATALAB Transport. Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Commissariat Général au Développement Durable, Service des données et études statistiques.
- Li, G. et Cheng, J.** (2019). Exploring the Effects of Traffic Density on Merging Behavior. *IEEE Access*, 7:51608–51619.
- Li, G., Yang, Z., Pan, Y. et Ma, J.** (2023). Analysing and modelling of discretionary lane change

- duration considering driver heterogeneity. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 11(1):343–360.
- Li, L., Jiang, R., He, Z., Chen, X. M. et Zhou, X.** (2020). Trajectory data-based traffic flow studies: A revisit. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114:225–240.
- Lighthill, M. J. et Whitham, G. B.** (1955). On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 229(1178):317–345.
- Lin, P.-W., Kang, K.-P. et Chang, G.-L.** (2004). Exploring the Effectiveness of Variable Speed Limit Controls on Highway Work-Zone Operations. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 8(3):155–168.
- Lu, X.-Y. et Shladover, S. E.** (2014). Review of Variable Speed Limits and Advisories: Theory, Algorithms, and Practice. *Transportation Research Record*, 2423(1):15–23.
- Ma, J., Li, X., Shladover, S., Rakha, H. A., Lu, X.-Y., Jagannathan, R. et Dailey, D. J.** (2016). Freeway Speed Harmonization. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1(1):78–89.
- Mahmud, S. S., Ferreira, L., Hoque, M. S. et Tavassoli, A.** (2019). Micro-simulation modelling for traffic safety: A review and potential application to heterogeneous traffic environment. *IATSS Research*, 43(1):27–36.
- Makridis, M. A., Anesiadou, A., Mattas, K., Fontaras, G. et Ciuffo, B.** (2023). Characterising driver heterogeneity within stochastic traffic simulation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 11(1):725–743.
- Marczak, F.** (2014). *Observation empirique et modélisation des discontinuités du réseau autoroutier : vers l'estimation des capacités*. Thèse de doctorat, École nationale des travaux publics de l'État, Vaulx-en-Velin (France).
- Marczak, F. et Buisson, C.** (2014). Analytical Derivation of Capacity at Diverging Junctions. *Transportation Research Record*, 2422(1):88–95.
- Marczak, F., Leclercq, L. et Buisson, C.** (2015). A Macroscopic Model for Freeway Weaving Sections. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(6):464–477.
- Mariotte, G.** (2018). *Dynamic Modeling of Large-Scale Urban Transportation Systems*. Thèse de doctorat, École nationale des travaux publics de l'État, Vaulx-en-Velin (France).
- Martin, J.-L.** (2002). Relationship between crash rate and hourly traffic flow on interurban motorways. *Accident Analysis & Prevention*, 34(5):619–629.
- Martin, P. T., Dhruvajyoti, L. et Stevanovic, A.** (2005). *Review of the effectiveness of the high occupancy vehicle lanes extension*. Rapport technique, University of Utah, Salt Lake City (États-Unis).
- Martin, P. T., Perrin, J., Wu, P. et Lambert, R.** (2004). *Evaluation of the Effectiveness of High Occupancy Vehicle Lanes*. Rapport technique, University of Utah, Salt Lake City (États-Unis).
- Martin, S. et Dubuisson-Quellier, S.** (2019). « Face à l'urgence climatique, méfions-nous de la sur-responsabilisation des individus ». *The Conversation*. <http://theconversation.com/face-a-lurgence-climatique-mefions-nous-de-la-sur-responsabilisation-des-individus-116481>, 21 mai.
- Mateos, M., Pfaffenbichler, P. et Sánchez, A.** (2006). Transport policy contribution to

- Sustainability in Madrid. A new assessing framework. Dans *CORP 2006 & Geomultimedia06 Proceedings*, pp. 175–185. Vienne (Autriche).
- May, A. D.** (1990). *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs (États-Unis).
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. et Behrens, W. W.** (1972). *The limits to growth*. Universe Books, New York (États-Unis). https://collections.dartmouth.edu/teitexts/meadows/diplomatic/meadows_ltg-diplomatic.html.
- Medina Tapia, M. et Robusté, F.** (2019). Implementation of Connected and Autonomous Vehicles in Cities Could Have Neutral Effects on the Total Travel Time Costs: Modeling and Analysis for a Circular City. *Sustainability*, 11(1):1–18.
- Menendez, M.** (2006). *An Analysis of HOV Lanes: Their Impact on Traffic*. Thèse de doctorat, University of California, Berkeley (États-Unis).
- Menendez, M. et Daganzo, C. F.** (2007). Effects of HOV lanes on freeway bottlenecks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(8):809–822.
- Meyer, J., Becker, H., Bösch, P. M. et Axhausen, K. W.** (2017). Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities? *Research in Transportation Economics*, 62:80–91.
- Michaels, R. et Fazio, J.** (1989). Driver behavior model of merging. *Transportation Research Record*, 1213:4–10.
- Minett, P. et Pearce, J.** (2011). Estimating the Energy Consumption Impact of Casual Carpooling. *Energies*, 4(1):126–139.
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires** (2022). Plan national covoiturage du quotidien. Dossier de presse. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/22243_plan-Covoiturage_DP_V2maj.pdf, 12 décembre.
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires** (2023). Le fonds vert. Fonds d'accélération de la transition écologique dans les territoires. Axe 3 : développement du covoiturage. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Cahier%20accompagnement_Axe3_Covoiturage.pdf, 30 janvier.
- Mohammadian, S., Zheng, Z., Haque, M. M. et Bhaskar, A.** (2021). Performance of continuum models for realworld traffic flows: Comprehensive benchmarking. *Transportation Research Part B: Methodological*, 147:132–167.
- Moskowitz, K.** (1965). Discussion of "Freeway level of service as influenced by volume and capacity characteristics" by D. R. Drew and C. J. Keese. *Highway Research Record*, 99:43–44.
- Munch, E. et Proulhac, L.** (2019). Le paradoxe de l'heure de pointe et des horaires de travail flexibles. *Territoire en mouvement*, (42).
- Métropole de Lyon** (2023). « Aire de Dardilly La Brochetière. Changement d'échelle pour le covoiturage sur le territoire de la Métropole de Lyon ». Dossier de presse, https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/espace-presse/dp/2023/20230320_dp_dardilly-covoiturage.pdf, 20 mars.
- Newell, G. F.** (1982). *Applications of Queueing Theory*. Chapman and Hall, New York (États-Unis).
- Newell, G. F.** (1993a). A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part I: General theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 27(4):281–287.

- Newell, G. F.** (1993b). A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part II: Queueing at freeway bottlenecks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 27(4):289–303.
- Newell, G. F.** (1998). A moving bottleneck. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32(8):531–537.
- Newell, G. F.** (2002). A simplified car-following theory: a lower order model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(3):195–205.
- Newman, L., Nuworsoo, C. et May, A. D.** (1988). Operational and Safety Experience with Freeway HOV Facilities in California. *Transportation Research Board*, 1173:18–24.
- Nie, J., Zhang, J., Wan, X., Ding, W. et Ran, B.** (2016). Modeling of decision-making behavior for discretionary lane-changing execution. Dans *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 707–712.
- Nilsson, G.** (2004). *Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety*. Thèse de doctorat, Lund Institute of Technology, Lund (Suède).
- Noland, R. B., Cowart, W. A. et Fulton, L. M.** (2006). Travel demand policies for saving oil during a supply emergency. *Energy Policy*, 34(17):2994–3005.
- Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., Stamp, A., Zah, R. et Althaus, H.-J.** (2010). Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 44(17):6550–6556.
- Ntziachristos, L., Gkatzoflias, D., Kouridis, C. et Samaras, Z.** (2009). COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model. Dans I. N. Athanasiadis, A. E. Rizzoli, P. A. Mitkas et J. M. Gómez, éd., *Information Technologies in Environmental Engineering: Proceedings of the 4th International ICSC Symposium*, pp. 491–504. Thessalonique (Grèce).
- Oh, S. et Yeo, H.** (2012). Estimation of Capacity Drop in Highway Merging Sections. *Transportation Research Record*, 2286(1):111–121.
- Oketch, T. et Carrick, M.** (2005). Calibration and Validation of a Micro-Simulation Model in Network Analysis. Dans *Transportation Research Board 84th Annual Meeting*, pp. 1–17. Washington D.C. (États-Unis).
- Olsson, L. E., Maier, R. et Friman, M.** (2019). Why Do They Ride with Others? Meta-Analysis of Factors Influencing Travelers to Carpool. *Sustainability*, 11(8):2414.
- Organisation des Nations unies** (2022). *World Population Prospects 2022. Summary of Results*. Rapport technique, United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York (États-Unis).
- Ossen, S. et Hoogendoorn, S. P.** (2011). Heterogeneity in car-following behavior: Theory and empirics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(2):182–195.
- Padoan, E. et Amato, F.** (2018). Chapter 2 - Vehicle Non-Exhaust Emissions: Impact on Air Quality. Dans F. Amato, éd., *Non-Exhaust Emissions*, pp. 21–65. Academic Press.
- Pande, A. et Abdel-Aty, M.** (2006). Assessment of freeway traffic parameters leading to lane-change related collisions. *Accident Analysis & Prevention*, 38(5):936–948.
- Papageorgiou, M., Kosmatopoulos, E. et Papamichail, I.** (2008). Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow. *Transportation Research Record*, 2047(1):37–48.
- Papageorgiou, M. et Kotsialos, A.** (2002). Freeway ramp metering: an overview. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3(4):271–281.

- Patire, A. D. et Cassidy, M. J.** (2011). Lane changing patterns of bane and benefit: Observations of an uphill expressway. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(4):656–666.
- Petitjean, P., Purson, E., Aliaga, F., Stein, C., Taraschini, L., Klein, É., Bacelar, A., Rocher-Lacoste, F. et Gobert, O.** (2019). *Experimentation of a sensor for measuring the occupancy rate of vehicles on the network of the Direction des Routes Île-de-France (DiRIF)*. Rapport technique, Cerema, DiRIF, AximunNEC.
- Pigalle, É. et Aguiléra, A.** (2020). Covoitureurs des villes, covoitureurs des champs. Une analyse spatialisée du covoiturage en France. Dans Y. Demoli, éd., *Peut-on se passer de la voiture hors des centres urbains ?*, pp. 173–187. Maison de sciences de l’Homme Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette (France).
- Popov, A., Hegyi, A., Babuška, R. et Werner, H.** (2008). Distributed Controller Design Approach to Dynamic Speed Limit Control against Shockwaves on Freeways. *Transportation Research Record*, 2086(1):93–99.
- Punzo, V., Cascetta, E. et Bonnel, P.** (2012). Impact on vehicle speeds and pollutant emissions of a fully automated section speed control scheme on the Naples urban motorway. Dans *19th ITS World Congress*, pp. 1–27. Vienne (Autriche).
- Punzo, V. et Montanino, M.** (2020). A two-level probabilistic approach for validation of stochastic traffic simulations: impact of drivers’ heterogeneity models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 121:102843.
- Punzo, V., Zheng, Z. et Montanino, M.** (2021). About calibration of car-following dynamics of automated and human-driven vehicles: Methodology, guidelines and codes. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 128:103–165.
- Quarmby, D. A.** (1967). Choice of Travel Mode for the Journey to Work: Some Findings. *Journal of Transport Economics and Policy*, 1(3):273–314.
- Raballand, W. et Laharotte, P.-A.** (2019). Estimation du potentiel de covoiturage par la modélisation des déplacements. Dans *46e Congrès ATEC ITS France*, pp. 1–10. Montrouge (France).
- Ranjitkar, P., Nakatsuji, T. et Kawamura, A.** (2005). Car-Following Models: An Experiment Based Benchmarking. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6:1582–1596.
- Ratrouf, N., Rahman, S. M. et Box, K.** (2009). A comparative analysis of currently used microscopic and macroscopic traffic simulation software. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 34.
- Reina, P. et Ahn, S.** (2014). Prediction of merge ratio using lane flow distribution. Dans *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, pp. 1–15. Washington D.C. (États-Unis).
- Reynaud, J.-L., Albert, A., Bégaule, J.-C., Lagarde, Y., Le Moing, S., Manzano, P., Moisan, O., Petiot, O., Pertus, É. et Williams, R.** (2013). *Voies structurantes d’agglomération. Conception des artères urbaines à 70 km/h*. Rapport technique, Certu, Lyon (France). Collection : Références.
- Richards, P. I.** (1956). Shock Waves on the Highway. *Operations Research*, 4(1):42–51.
- Riou, R.** (2019). *Analyse de l’impact d’un différentiel de vitesse sur le changement de voie : cas*

des voies de covoiturage. Travail de fin d'études et mémoire de master, École nationale des travaux publics de l'État, Vaulx-en-Velin (France).

- Rocchi, J.-F., Panhaleux, J., Pichon, F., d'Aubreby, M. et Bordry, F.** (2014). *Rapport sur les nouveaux usages de la route*. Rapport technique, Inspection Générale de l'Administration (Ministère de l'Intérieur), Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie).
- Rousic, S., Ancelet, O., Levilly, B., de Wissocq, M., Bacelar, A., Balmeffrezol, P., Hans, É., Huillet, J., Lemoine, D., Luzerne, M., Odoard, F., Williams, R. et Sproni, N.** (2020). *Voies structurantes d'agglomération. Aménagement des voies réservées au covoiturage et à certaines catégories de véhicules*. Rapport technique, Cerema, Bron (France). Collection : Références.
- Rousic, S., Bacelar, A., Luzerne, M. et Ancelet, O.** (2018). *Mission de parangonnage 2018. Les voies réservées pour les véhicules à occupation multiple : l'exemple du Canada*. Rapport technique, Cerema, Aix-en-Provence (France).
- Roy, R. et Saha, P.** (2018). Headway distribution models of two-lane roads under mixed traffic conditions: a case study from India. *European Transport Research Review*, 10(1):1–12.
- Rämä, P.** (1999). Effects of Weather-Controlled Variable Speed Limits and Warning Signs on Driver Behavior. *Transportation Research Record*, 1689(1):53–59.
- Saifuzzaman, M. et Zheng, Z.** (2014). Incorporating human-factors in car-following models: A review of recent developments and research needs. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 48:379–403.
- Saifuzzaman, M., Zheng, Z., Haque, M. M. et Washington, S.** (2017). Understanding the mechanism of traffic hysteresis and traffic oscillations through the change in task difficulty level. *Transportation Research Part B: Methodological*, 105:523–538.
- Sala, M. et Soriguera, F.** (2018). Freeway lane-changing: some empirical findings. *Transportation Research Procedia*, 33:107–114.
- Schijns, S. et Eng, P.** (2006). High occupancy vehicle lanes—worldwide lessons for European practitioners. Dans *Urban Transport XII: Urban Transport and the Environment in the 21st Century*, vol. 1, pp. 181–193. WIT Press, Prague (Tchéquie).
- Service des données et études statistiques** (2020). « 38,2 millions de voitures en circulation en France ». Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports, <https://statistiques.developpement-durable.gouv.fr/382-millions-de-voitures-en-circulation-en-france>, Ministère de la Transition écologique.
- Shaheen, S., Stocker, A. et Mundler, M.** (2017). Online and App-Based Carpooling in France: Analyzing Users and Practices—A Study of BlaBlaCar. Dans G. Meyer et S. Shaheen, édés., *Disrupting Mobility: Impacts of Sharing Economy and Innovative Transportation on Cities*, Lecture Notes in Mobility, pp. 181–196. Springer International Publishing.
- Shao, H., Lam, W. H. K., Sumalee, A., Chen, A. et Hazelton, M. L.** (2014). Estimation of mean and covariance of peak hour origin–destination demands from day-to-day traffic counts. *Transportation Research Part B: Methodological*, 68:52–75.
- Siuhi, S. et Mussa, R.** (2007). Simulation Analysis of Truck-Restricted and High-Occupancy Vehicle Lanes. *Transportation Research Record*, 2012(1):127–133.

- Skowronek, D. A., Ranft, S. E. et Cothron, A. S.** (2002). *An Evaluation of Dallas Area HOV Lanes, Year 2002*. Rapport technique 4961-6, Texas Transport Institute, College Station (États-Unis).
- Smulders, S.** (1990). Control of freeway traffic flow by variable speed signs. *Transportation Research Part B: Methodological*, 24(2):111–132.
- Soriguera, F., Martínez, I., Sala, M. et Menendez, M.** (2017). Effects of low speed limits on freeway traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77:257–274.
- Soriguera, F., Torné, J. M. et Rosas, D.** (2013). Assessment of Dynamic Speed Limit Management on Metropolitan Freeways. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 17(1):78–90.
- Southworth, F. et Westbrook, F.** (1985). *Study of current and planned high occupancy vehicle lane use: performance and prospects*. Rapport technique ORNL/TM-9847, Oak Ridge National Lab, Oak Ridge (États-Unis).
- Stokkink, P., de Palma, A. et Geroliminis, N.** (2023). Carpooling with Transfers and Travel Time Uncertainty. Dans *hEART 2023, 11e symposium du European Association for Research in Transportation*, pp. 1–8. Zurich (Suisse).
- Storani, F., Di Pace, R., Bruno, F. et Fiori, C.** (2021). Analysis and comparison of traffic flow models: a new hybrid traffic flow model vs benchmark models. *European Transport Research Review*, 13(1):16.
- Sunderrajan, A., Viswanathan, V., Cai, W. et Knoll, A.** (2016). Traffic State Estimation Using Floating Car Data. *Procedia Computer Science*, 80:2008–2018.
- Syndicat mixte des mobilités de l'aire grenobloise** (2020). « M covoit' Lignes+. Le covoiturage du quotidien, la facilité en + ! ». Flyer de communication, https://actionsociale.finances.gouv.fr/files/live/sites/actionsociale/files/Contributed/DÃIÃIgationdÃIpartementalesdel'actionsociale/38IsÃIre/MCovoitGuide_Gresivaudan_2020digital.pdf.
- Thomson, T., Liu, X. C., Wang, Y., Schroeder, B. J. et Roupail, N. M.** (2012). Operational Performance and Speed–Flow Relationships for Basic Managed Lane Segments. *Transportation Research Record*, 2286(1):94–104.
- Torné, J. M., Soriguera, F. et Geroliminis, N.** (2014). On the Consistency of Freeway Macroscopic Merging Models. *Transportation Research Record*, 2422(1):34–41.
- Toshniwal, P., Hanai, M. et Liu, E. S.** (2017). Towards a Benchmark for the Quantitative Evaluation of Traffic Simulators. Dans *Proceedings of the 2017 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*, SIGSIM-PADS '17, pp. 259–262. Association for Computing Machinery, New York (États-Unis).
- Treiber, M. et Kesting, A.** (2013). *Traffic Flow Dynamics. Data, Models and Simulation*. Springer, Heidelberg (Allemagne).
- Troutbeck, R.** (2002). The Performance of Uncontrolled Merges Using a Limited Priority Process. Dans M. A. P. Taylor, éd., *Proceedings of the 15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pp. 463–482. Adélaïde (Australie).
- van Beinum, A., Broekman, E., Farah, H., Schakel, W., Wegman, F. et Hoogendoorn, S.** (2020). Critical Assessment of Microscopic Simulation Models for Simulating Turbulence around Motorway Ramps. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*,

146(2):04019066.

- van den Hoogen, E. et Smulders, S.** (1994). Control by variable speed signs: results of the Dutch experiment. Dans *Seventh International Conference on 'Road Traffic Monitoring and Control'*, pp. 145–149. Londres (Royaume-Uni).
- van Winsum, W.** (1999). The human element in car following models. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4):207–211.
- Veve, C.** (2021). *Détection de zones spatio-temporelles à fort potentiel, pour contribuer à la mise en place de services de mobilité partagée et de microtransit*. Thèse de doctorat, École nationale des travaux publics de l'État, Vaulx-en-Velin (France).
- Viallon, V. et Laumon, B.** (2013). Fractions of fatal crashes attributable to speeding: Evolution for the period 2001–2010 in France. *Accident Analysis & Prevention*, 52:250–256.
- Vincent, S.** (2008). *Les « altermobilités » : analyse sociologique d'usages de déplacements alternatifs à la voiture individuelle. Des pratiques en émergence ?* Thèse de doctorat, Université Paris-V – René-Descartes, Paris (France).
- Vinci Autoroutes** (2023). « 4e édition du baromètre de l'autosolisme de VINCI Autoroutes ». Communiqué de presse, https://corporate.vinci-autoroutes.com/sites/default/files/2023-09/20230919_CP_VINCIAutoroutes_Baromètredel'autosolismeVDef.pdf, 19 septembre.
- Wagner, N.** (2016). *Covoiturage longue distance : état des lieux et potentiel de croissance*. Rapport technique, Commissariat Général au Développement Durable, Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable. Collection : Études & documents, n°146.
- Wang, J.-P., Huang, H.-J. et Ban, X.** (2019). Optimal capacity allocation for high occupancy vehicle (HOV) lane in morning commute. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 524:354–361.
- Washington State Department of Transportation** (2012). *The 2012 Congestion Report*. Rapport technique, Olympia (États-Unis).
- Wiedemann, R.** (1974). *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen vol. 8, Universität Karlsruhe, Karlsruhe (Allemagne).
- Wunderlich, K., Vasudevan, M. et Wang, P.** (2018). "Data Driven Analysis Techniques in Reliability Space". Transportation Research Board 97th Annual Meeting, Washington D.C. (États-Unis), 7 janvier.
- Yang, H.-H. et Peng, H.** (2010). Development of an errorable car-following driver model. *Vehicle System Dynamics*, 48(6):751–773.
- Zackor, H.** (1991). Speed Limitation on Freeways: Traffic-Responsive Strategies. Dans M. Papageorgiou, éd., *Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation Systems*, pp. 507–511. Pergamon.
- Zallinger, M. S. et Le Anh, T.** (2005). Improving an Instantaneous Emission Model for Passenger Cars. vol. 85/I. Verlag der Technischen Universität Graz.
- Zegeye, S. K., De Schutter, B., Hellendoorn, J., Breunese, E. A. et Hegyi, A.** (2012). A Predictive Traffic Controller for Sustainable Mobility Using Parameterized Control Policies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3):1420–1429.

- Zhang, G., Ma, X. et Wang, Y.** (2014). Self-Adaptive Tolling Strategy for Enhanced High-Occupancy Toll Lane Operations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(1):306–317.
- Zhang, G., Wang, Y., Wei, H. et Yi, P.** (2008). A Feedback-Based Dynamic Tolling Algorithm for High-Occupancy Toll Lane Operations. *Transportation Research Record*, 2065(1):54–63.
- Zheng, Z.** (2014). Recent developments and research needs in modeling lane changing. *Transportation Research Part B: Methodological*, 60:16–32.
- Zhong, L., Zhang, K., Nie, Y. et Xu, J.** (2020). Dynamic carpool in morning commute: Role of high-occupancy-vehicle (HOV) and high-occupancy-toll (HOT) lanes. *Transportation Research Part B: Methodological*, 135:98–119.

Annexes

A Questionnaire utilisé pour mener les entretiens

En amont du déploiement : motivations, conception, acteurs, évaluation *a priori*

- Qui initie l'idée d'un projet de déploiement de VR2+? (collectivité/politique : métropole, conseil départemental; service déconcentré (DIR, DREAL); demande des usagers; concessionnaire; ...)
- Quelle est la motivation/le besoin principal(e)? Pourquoi déployer une VR2+ plutôt qu'une autre stratégie de gestion du trafic?
- Quelles sont les parties prenantes dans la concrétisation du projet? Comment les acteurs locaux y sont-ils associés?
- Comment le projet est-il accepté par les gestionnaires de la route (au sein du PC notamment)?
- Pourquoi déployer la VR2+ sur telle infrastructure et telle section en particulier?
 - En quoi les conditions de trafic et la géométrie routière du terrain sont-elles favorables à une mise en œuvre de la VR2+?
 - Sur le terrain, de quelles contraintes immuables faut-il tenir compte?
 - Le contexte territorial est-il favorable à un tel déploiement? (par exemple : nouvelle dynamique de population, d'emplois? augmentation des flux routiers? promotion des mobilités propres dont profiterait ce déploiement?..)
- Quels sont les travaux nécessaires, sur la voirie, pour permettre de déployer la VR2+?
- Si vous êtes exploitant, quelles étaient vos craintes (impact sur le travail, les interventions, ...) et vos attentes autour de ce nouveau projet?
- Quels critères et indicateurs avez-vous choisi pour rendre compte de la réussite du projet et de la performance de la VR2+? Pour ces critères et indicateurs, quels étaient les « gains » prévus par rapport à la situation sans VR2+ et quels étaient vos objectifs?
 - Liés à l'exploitation (sécurité, congestion, ...);
 - Économiques, sociaux, environnementaux;
 - Ceux mis en avant par les exploitants sont-ils différents de ceux des experts?
- Quels outils de mesure et quelles données avez-vous à disposition pour juger du fonctionnement de la VR2+ et de l'évaluation de ses objectifs? Pouvez-vous partager ces données?
- Plus globalement, avez-vous réalisé une étude préalable ou une évaluation *a priori*? Avec quelle(s) méthode(s) (calcul analytique, simulation, données de terrain)? Que doit apporter cette évaluation?
- Anticipe-t-on que des violations au respect de la mesure peuvent être commises?
- Si vous êtes un(e) expert(e), pensez-vous qu'il faut accompagner le déploiement d'une VR2+ par d'autres mesures, comme la mise en œuvre de stratégies de gestion du trafic ou d'accompagnement aux mobilités partagées? Sont-elles réfléchies pendant la conception du projet ou le sont-elles en parallèle? Lesquelles recommanderiez-vous?
- De manière générale, comment s'assurer que le déploiement d'une VR2+ amènera à

- une augmentation, à plus ou moins long terme, de la pratique du covoiturage?
- Si vous êtes exploitant, quel est le coût du projet? Comment est-il ventilé?
- Avez-vous à disposition les études d'APS, d'APD, et le DCE (CCTP, notamment)? Des documents de communication, des dossiers de presse?

En aval du déploiement : exploitation et évaluation *a posteriori*

- Si vous êtes exploitant, les conducteurs comprennent-ils bien le dispositif? La signalisation est-elle claire pour eux? Quelle communication leur a été faite?
- Si vous êtes exploitant, observez-vous le respect de l'usage de la VR2+? Contrôlez-vous qu'il y a bien au moins deux personnes à bord d'un véhicule? Le cas échéant, comment?
- Si vous êtes exploitant, comment est activée la VR2+? Si vous êtes un(e) expert(e), comment devrait, selon vous, être activée une VR2+?
 - Possibilités d'activation :
 1. activation statique (sur une plage de temps prédéfinie, ou toujours activée);
 2. activation statique avec une stratégie de régulation des vitesses au préalable (abaissement progressif ou direct?);
 3. activation dynamique en fonction des conditions de trafic (quelles sont alors ces conditions?);
 4. une autre possibilité?
 - Pourquoi ce choix par rapport aux autres possibilités?
 - Le cas échéant, comment gère-t-on la désactivation de la VR2+? Y a-t-il une procédure de suivi particulière?
- Quels sont les points de vigilance opérationnels dont il faut tenir compte lorsque la VR2+ est activée?
- Avez-vous remarqué une dégradation des conditions de trafic à cause de la réorganisation des véhicules :
 - au niveau de l'interface amont et de l'interface aval?
 - au niveau des échangeurs, avec les véhicules qui doivent sortir et ceux qui entrent et doivent aller sur la VR2+?
- Observe-t-on une fréquence plus élevée d'accidents depuis le déploiement de la VR2+?
- Quels sont les autres effets secondaires observés du fait du déploiement de la VR2+? Qu'avez-vous remarqué d'inattendu (résultat contre-intuitif, phénomène de trafic non prévu, ...)?
- Si l'on pouvait passer outre les contraintes immuables liées à l'exploitation de la VR2+, quelles stratégies mettriez-vous en place pour la gérer? (par exemple : où placeriez-vous les capteurs? comment aménageriez-vous la voirie? quelles données voudriez-vous avoir? à quel endroit la commenceriez/termineriez-vous?...)
- Si vous êtes exploitant, avez-vous atteint rempli les objectifs et critères fixés durant la phase de projet? En avez-vous défini de nouveaux depuis la mise en fonctionnement?
- Avez-vous remarqué un changement dans la demande en trafic et en mobilités partagées depuis que la VR2+ est déployée? Est-ce lié à la VR2+ ou à autre chose?
- Plus globalement, avez-vous réalisé/comptez-vous réaliser une évaluation *a posteriori* ou un retour d'expérience de la VR2+?
 - Si oui, avec quelle méthodologie?
 - À quelle échelle temporelle et spatiale?
 - Intègre-t-elle une évaluation économique, sociale et environnementale?
 - Les résultats sont-ils centralisés à l'échelle nationale pour alimenter une doctrine globale?
 - En somme, que doit-elle apporter?

B Synoptiques des VR2+ ayant fait l'objet d'un entretien

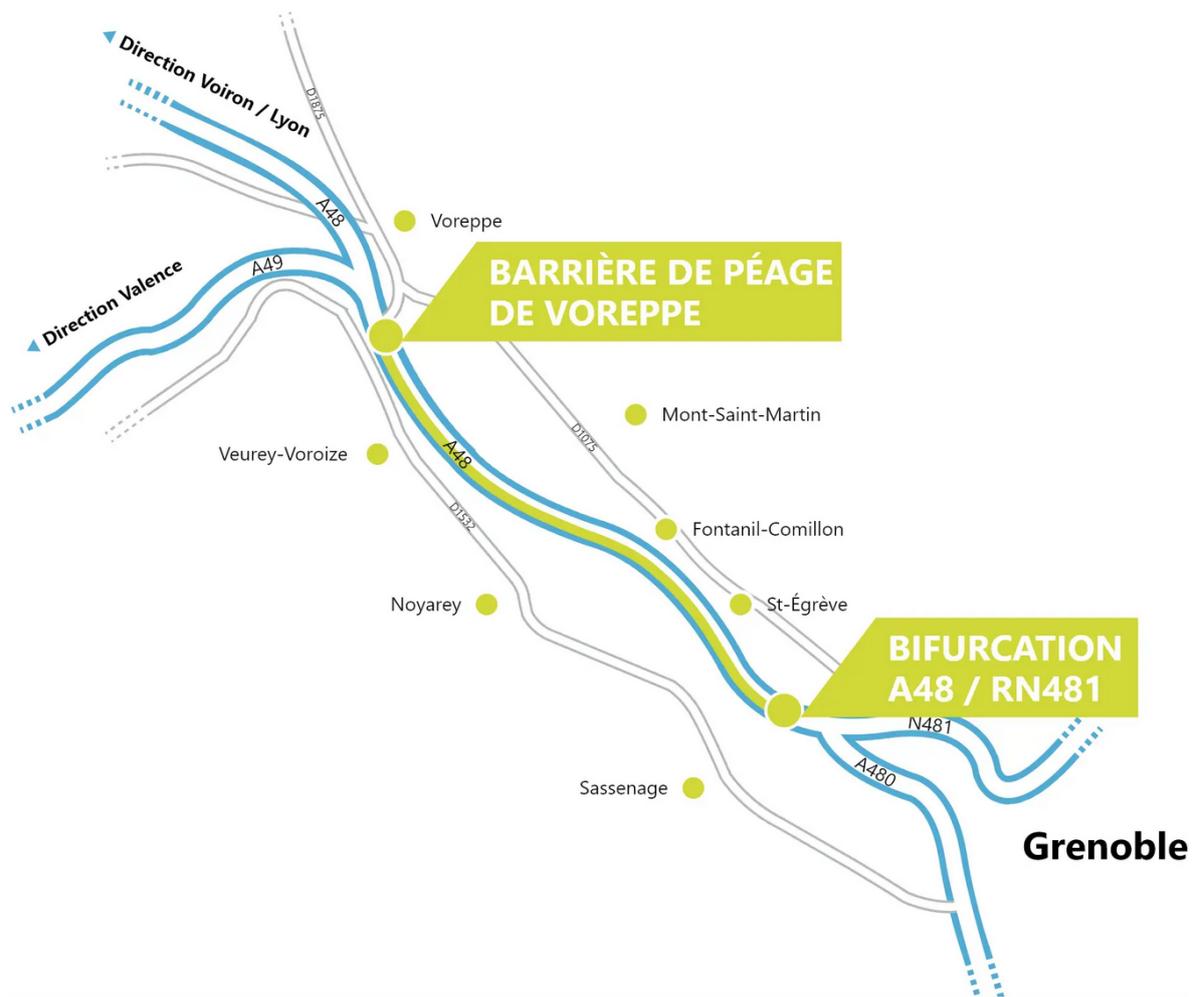


FIGURE B.1 – Synoptique simplifié de la VR2+ déployée sur l'A48. Source : <https://area-covoiturage.com/>

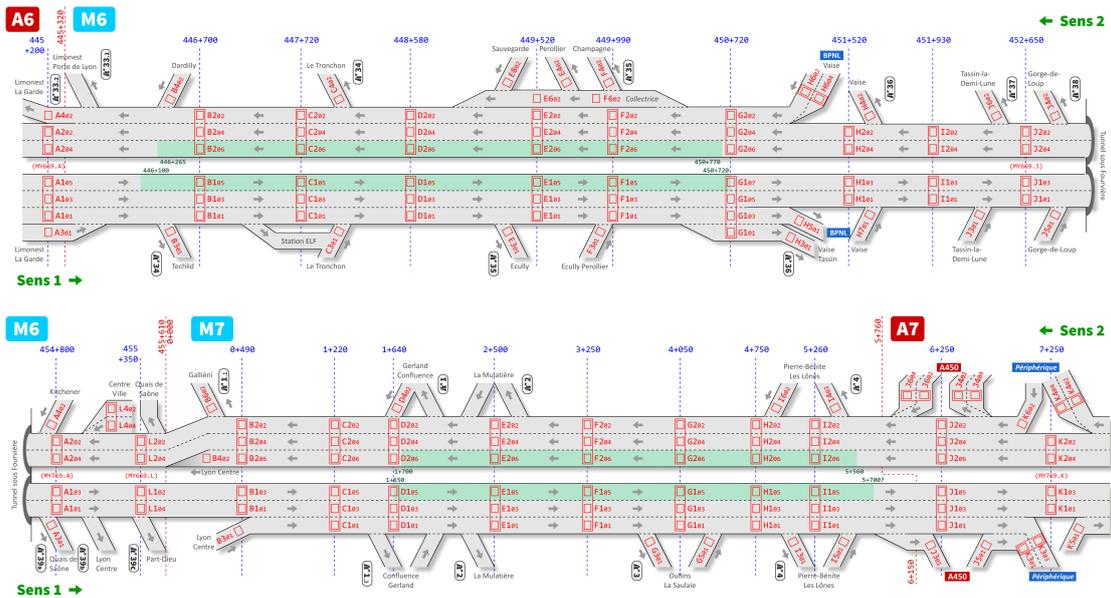


FIGURE B.2 – Synoptique des quatre VR2+ déployées sur la M6 et la M7. Source : Métropole de Lyon

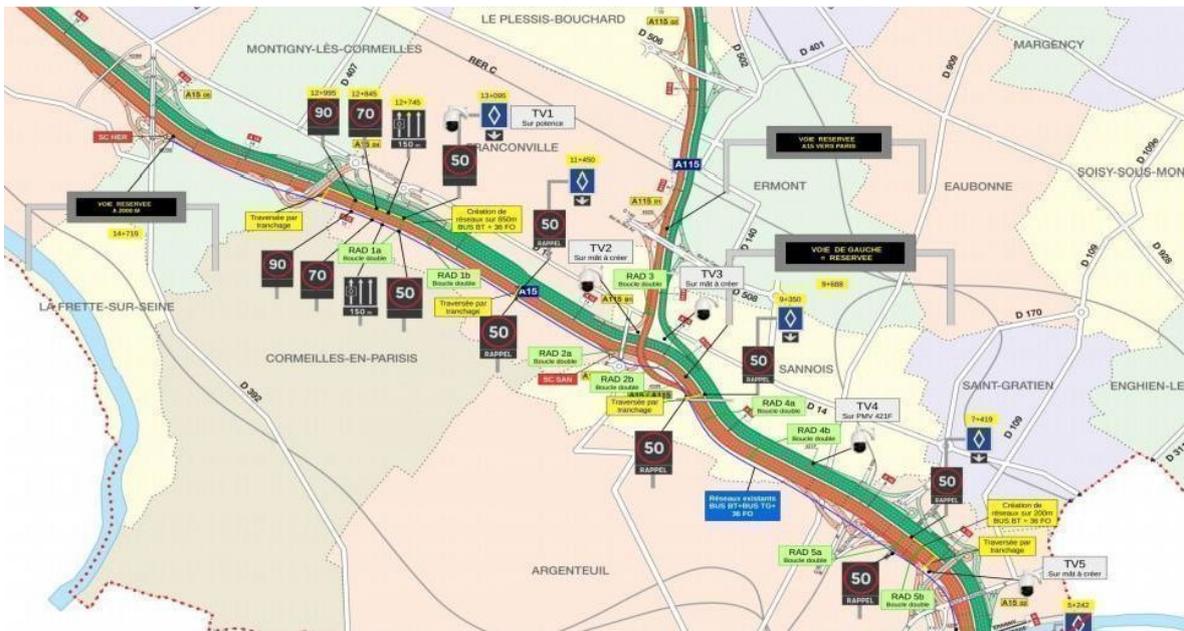


FIGURE B.3 – Synoptique simplifié lié au projet de VR2+ sur l’A15. Source : DiRif

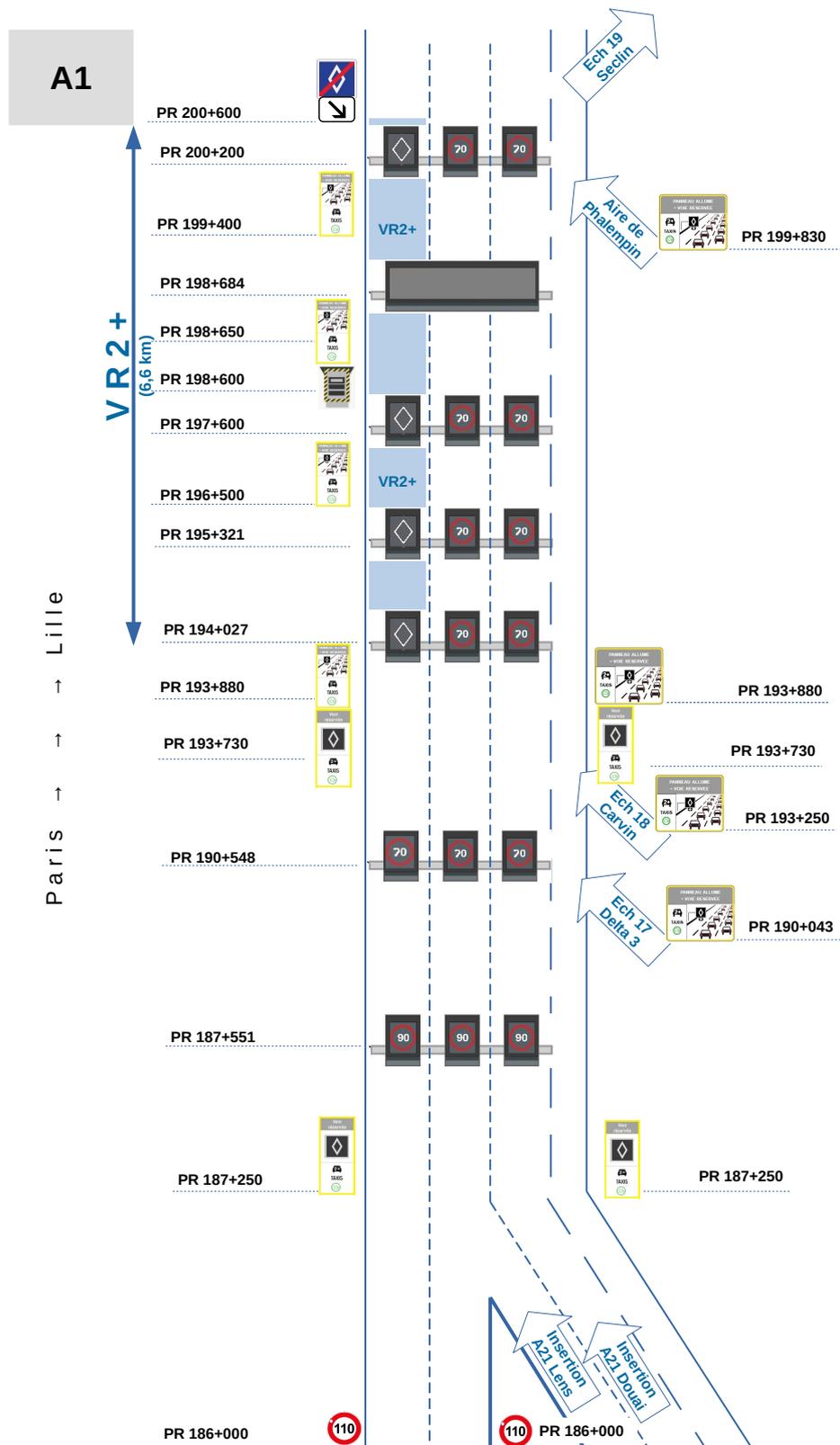


FIGURE B.4 – Synoptique de la VR2+ déployée sur l’A1, de juillet 2023 à l’automne 2023. Source : DIR Nord

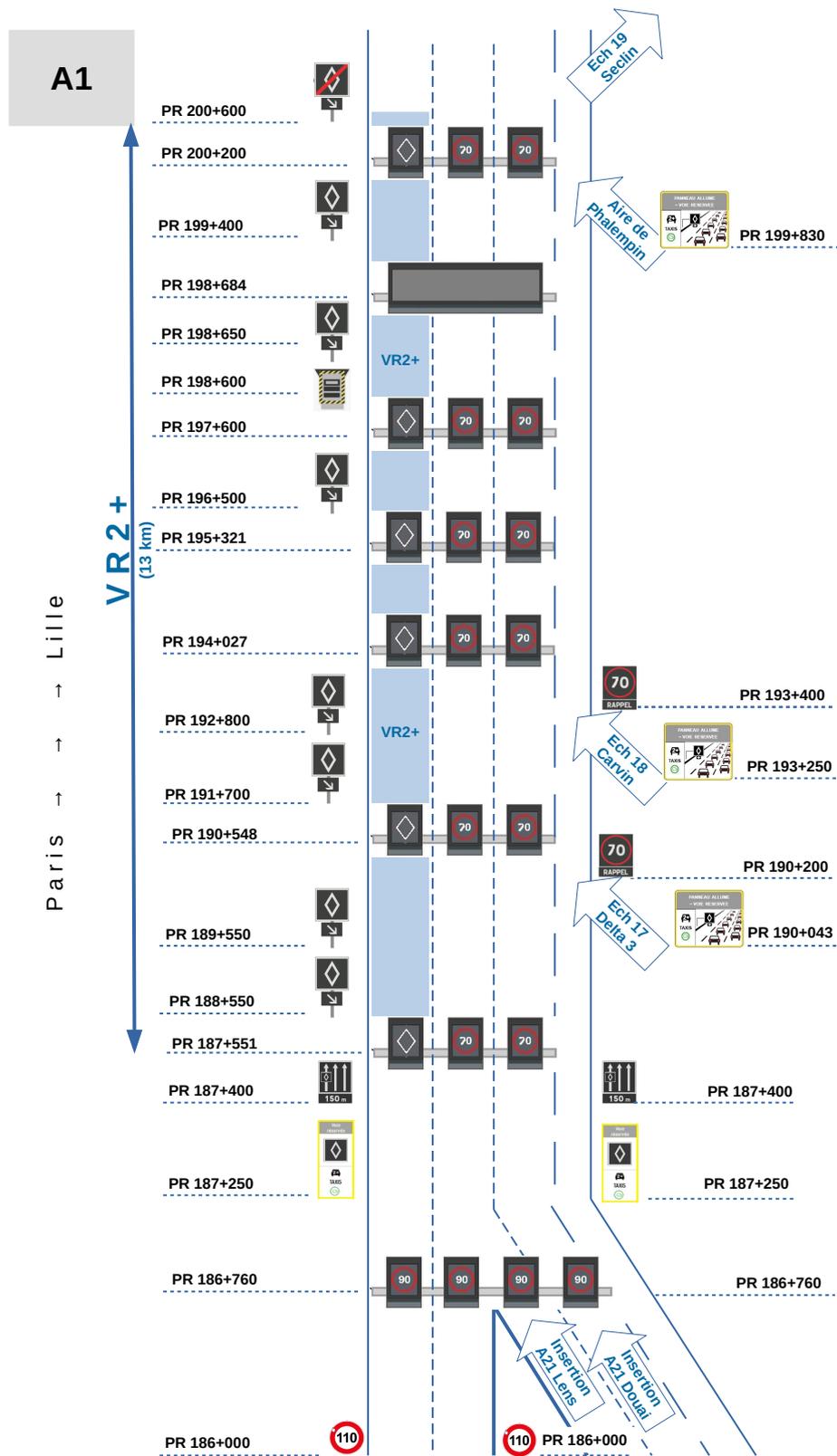


FIGURE B.5 – Synoptique de la VR2+ déployée sur l’A1, à partir de l’automne 2023. Source : DIR Nord

FOLIO ADMINISTRATIF

THÈSE SOUTENUE DEVANT L'ÉCOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'ÉTAT

Nom : Boukhellouf

Date de soutenance : 14 mars 2024

Prénoms : Mathis, Slimane, Brahim

Titre :

Voies réservées au covoiturage : vers l'évaluation de la performance

Nature : doctorat

Numéro d'ordre : 2024ENTP0004

École doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie civil et Acoustique (n°162)

Spécialité : ingénierie de la mobilité et des réseaux

Résumé :

Dans un contexte de promotion des mobilités partagées, la législation permet, depuis 2020 en France, de mener des expérimentations de voies réservées aux véhicules à deux occupants ou plus. C'est l'un des leviers utilisés pour développer le covoiturage courte distance au quotidien. La thèse développe des outils d'évaluation de la performance de ces voies réservées sur des autoroutes urbaines, qui sont la principale cible de ce déploiement expérimental. Pour cela, des méthodes analytiques sont proposées, en complément des méthodes de simulation. À partir de données obtenues dans un cas réel, la finalité de ces méthodes est de déterminer les temps passés par les covoitureurs et les autosolistes, pour différentes conditions de demande et d'offre, ainsi que pour différentes mesures d'accompagnement prévues et permises par la réglementation. Ainsi, on peut définir les configurations de trafic pour lesquelles le gain de temps pour les covoitureurs, à la fois par rapport aux autosolistes et par rapport à la situation précédant le déploiement, est assuré. Ces gains sont un gage important de crédibilité et de pertinence afin d'enclencher, sur les principaux axes routiers, un report modal vers les mobilités partagées.

Mots-clé :

voies réservées, covoiturage, report modal, modélisation analytique du trafic, simulation microscopique du trafic, chute de capacité, temps de parcours, évaluation

Laboratoire de recherche :

Laboratoire d'Ingénierie Circulation et Transports – Éco-gestion des Systèmes Énergétiques pour les Transports (LICIT-Éco7)

Directeur de thèse : Nicolas Chiabaut

Co-directrice de thèse : Christine Buisson

Président du jury : Ludovic Leclercq

Composition du jury :

Ludovic Leclercq	DR, HDR	ENTPE / Université G. Eiffel	président du jury
Romain Billot	professeur, HDR	IMT Atlantique	rapporteur
Jérôme Hârri	professeur, docteur	EURECOM	rapporteur
Estelle Chevallier	ICPEF, docteur	DGITM	examinatrice
Nicolas Chiabaut	IDTPE, HDR	Département de la Haute-Savoie	directeur de thèse
Christine Buisson	DR, HDR	ENTPE / Université G. Eiffel	co-directrice de thèse