

Louvain School of Management

***Comment les modèles "multi-agents"
peuvent-ils être utilisés pour estimer les
impacts d'une modification de la
limitation de vitesse sur un axe routier ?***

Auteur : Bellet Gautier

Promoteur : Jourquin Bart

Année académique 2023-2024

Master [120] : Ingénieur de gestion, Majeure Transportation Management and Supply Chain et Option Decision Marketing

Déclaration concernant l'utilisation d'outils IA dans un mémoire

Nous reconnaissons que les outils d'IA peuvent être des aides précieuses lors du travail de thèse de master, mais ils ne sont pas infaillibles. Rappelez-vous que la transparence favorise la confiance et que reconnaître le rôle de l'IA renforce la crédibilité de votre travail.

Par conséquent, lorsque vous décidez d'utiliser un tel outil, vous devez adhérer aux principes suivants d'utilisation responsable de l'IA.

1. Évaluation Critique :

- J'ai évalué de manière critique les résultats générés par l'IA, en assurant leur alignement avec mes objectifs de recherche.
- Toutes les modifications ou corrections ont été apportées en fonction de mon expertise et de mes connaissances dans le domaine.

2. Transparence :

- Je reconnais de manière transparente l'utilisation de ChatGPT, en soulignant qu'il a contribué à mon travail mais n'a pas remplacé le jugement humain.
- Mon engagement envers la transparence garantit l'intégrité de ce mémoire.

3. Considérations Éthiques :

- J'ai surveillé activement les biais ou les conséquences non intentionnelles introduites par l'outil IA.
- Ma responsabilité éthique a guidé mes décisions tout au long du processus de recherche.

Déclaration

Durant la préparation de cette thèse de master, l'auteur a utilisé ChatGPT pour les raisons suivantes :

1. Aide à la rédaction (correction de tournures de phrases et d'orthographe).
2. Aide pour des calculs basiques du cas pratique.

Après avoir utilisé ChatGPT l'auteur a minutieusement révisé et édité le contenu produit par l'outil. J'assume entièrement la responsabilité du contenu final présenté dans ce mémoire.

En signant cette déclaration, j'affirme que le contenu de ce mémoire reflète mon travail original, augmenté par l'utilisation responsable de l'IA.

Résumé

Ce mémoire traite de l'évaluation des impacts d'une modification de la limitation de vitesse sur un axe routier en utilisant des modèles multi-agents. La problématique centrale est de déterminer comment ces modèles peuvent simuler et estimer les conséquences d'une variation des limites de vitesse sur différents indicateurs de performance routière, tels que la sécurité, les émissions de CO₂ et la consommation de carburant.

Pour répondre à cette question, ce travail adopte une méthodologie basée sur la simulation multi-agents, en utilisant l'outil SUMO (Simulation of Urban MObility). Trois scénarios de limitations de vitesse (110 km/h, 120 km/h, et 130 km/h) ont été testés sur un segment spécifique de l'autoroute E42 en Belgique. Les simulations ont permis d'observer les comportements des véhicules et d'analyser les impacts sur les temps de parcours, les émissions de gaz à effet de serre et la consommation de carburant.

Les résultats montrent que la réduction de la limitation de vitesse à 110 km/h entraîne une légère diminution des émissions de CO₂ et de la consommation de carburant, mais allonge le temps de parcours. À l'inverse, une augmentation de la limitation à 130 km/h réduit le temps de trajet mais augmente significativement les émissions de CO₂ et la consommation de carburant. Les données recueillies soulignent l'importance d'un équilibre entre la sécurité routière, l'efficacité énergétique et les impacts environnementaux dans la gestion des limitations de vitesse.

Ce mémoire met en lumière l'importance d'un équilibre entre la sécurité routière et les impacts environnementaux, tout en soulignant la complexité des décisions relatives aux limitations de vitesse sur les axes routiers. Les résultats obtenus peuvent informer les décideurs politiques sur les conséquences des modifications des limitations de vitesse, contribuant ainsi à une gestion plus efficace des infrastructures routières en Belgique.

Remerciements

Ce mémoire n'aurait pu être réalisé sans le soutien précieux, de près ou de loin, de nombreuses personnes tout au long de son élaboration. Je souhaite donc exprimer mes plus sincères remerciements à toutes celles et ceux qui m'ont aidé.

Tout d'abord, je tiens à remercier Monsieur Bart Jourquin, mon promoteur, pour les précieux conseils qu'il m'a prodigués, ainsi que pour sa disponibilité qui m'ont permis d'évoluer dans ce mémoire.

Enfin, je suis reconnaissant envers mes proches et ma famille pour leurs conseils, leur écoute attentive et leur bienveillance.

Table des matières

Déclaration concernant l'utilisation d'outils IA dans un mémoire	2
Déclaration	2
Résumé	3
Remerciements	4
Liste des tableaux.....	7
Liste des figures	7
Introduction générale	8
Contexte	9
La presse en parle.....	9
Rapport VIAS sur les mesures nationales de comportement en matière de vitesse.....	10
Motivations.....	13
Evaluation de l'impact de la vitesse et méthodologies.....	14
Mesurer l'impact sur la sécurité routière d'une modification de la limite de vitesse sur le réseau routier	14
Approche économique et institutionnelle des limitations de vitesse : les enseignements du Montana.....	15
Est-ce que la limitation de vitesse à 80 km/h sauve des vies en France ?	16
Premières réflexions.....	17
Simulation de trafic routier	18
Définition du trafic routier	18
Simulation	19
Niveau de granularité	19
Représentation du temps	21
L'aléatoire de la simulation	22
Modélisation comportementale de la tâche routière	22
Approche multi-agents	24
Concept.....	24
Agents.....	24
Environnement	26
Gestion du temps.....	26
Interaction.....	27

Modèles multi-agents existants	28
MATSim (The Multi-Agent Transport Simulation)	28
Une approche efficace pour créer des scénarios de simulation de transport basée sur le « Big Data ».....	30
Plateforme de simulation	32
Choix de la plateforme de simulation.....	32
Présentation de SUMO	33
Utilisation de SUMO (mise en place)	34
Sumo-gui.....	34
OpenstreetMap (OSM)	35
OSMWeb Wizard.....	35
Netedit	36
Exercice pratique	37
Méthodologie	37
Choix de l'axe routier.....	37
Etude de cas.....	38
Approche.....	38
Scénarios	41
Scénario 1 : limitations de vitesse à 120 km/h (paramètres actuels)	41
Scénario 2 : limitations de vitesse à 110 km/h	42
Scénario 3 : Limitations de vitesse à 130 km/h	43
Analyses de l'étude	44
Conclusion.....	46
Limites.....	46
Implications managériales.....	47
Conclusion générale	48
Bibliographie	49
Annexes	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : Limitations de vitesses sur les autoroutes européennes.....	10
Tableau 2 : Résultats VIAS Institute	11
Tableau 3 : Résultats scénario 1	41
Tableau 4 : Résultats moyens scénario 1	41
Tableau 5 : Résultats scénario 2	42
Tableau 6 : Résultats moyens scénario 2.....	42
Tableau 7 : Résultats scénario 3	43
Tableau 8 : Résultats moyens scénario 3.....	43
Tableau 9 : Comparaison des scénarios.....	45

Liste des figures

Figure 1 : Evolution du nombre de tués de l'Etat du Montant entre 1970 et 2003	16
Figure 2 : Niveau macroscopique.....	20
Figure 3 : Niveau microscopique	20
Figure 4 : Niveau mésoscopique	21
Figure 5 : Relation entre les agents et l'environnement.....	25
Figure 6 : Boucle MATSim	28
Figure 7 : Nouveau processus de création efficace de scénarios de simulation de transport basé sur les données de demande de téléphonie mobile.....	31
Figure 8 : Interface sumo-gui	34
Figure 9 : Interface OpenStreetMap – OSM	35
Figure 10 : Interface OSMWeb Wizard.....	36
Figure 11 : Interface Netedit.....	36
Figure 12 : Zone de simulation de l'exercice pratique	38

Introduction générale

L'objectif principal de ce mémoire est d'analyser la manière dont les modèles "multi-agents" peuvent être utilisés pour estimer les impacts d'une modification de la limitation de vitesse sur un axe routier. Dans un contexte où la gestion de la vitesse sur les routes revêt une importance capitale pour la sécurité routière, l'efficacité économique et l'impact environnemental.

Pour atteindre cet objectif, ce travail adopte une approche méthodologique structurée autour de la modélisation et de la simulation multi-agents, utilisant l'outil de simulation SUMO (Simulation of Urban MObility). Ce choix se justifie par la capacité des modèles multi-agents à reproduire les interactions complexes entre les différents usagers de la route et à fournir des résultats détaillés et pertinents.

Ce mémoire est structuré de manière à présenter une progression logique des concepts et des analyses. La première partie pose le cadre théorique et contextuel, avec une revue de la littérature sur les limitations de vitesse et leurs impacts sur la sécurité et l'économie. Cette section est suivie d'une description détaillée des méthodologies employées pour la simulation, incluant le choix des axes routiers, la configuration des scénarios de simulation, et les paramètres de la modélisation.

La deuxième partie du mémoire présente les résultats des simulations, comparant différentes limitations de vitesse et leurs effets sur divers indicateurs de performance tels que le temps de trajet, les émissions de CO₂ et la consommation de carburant. Ces résultats sont analysés et discutés en regard des études antérieures réalisées sur des problématiques similaires.

Il est important de noter que les simulations réalisées dans ce mémoire, bien que basées sur des modèles robustes et des données réalistes, sont soumises à certaines limitations. Les modèles multi-agents, bien qu'efficaces pour capturer la complexité des interactions routières, reposent sur des hypothèses simplificatrices qui ne reflètent pas toujours la diversité des comportements réels des conducteurs.

En définitive, ce mémoire vise à fournir une évaluation nuancée et détaillée des impacts des modifications de limitations de vitesse, en utilisant des outils de simulation avancés pour informer la prise de décision en matière de politique de transport. Les résultats obtenus offrent des perspectives pour améliorer l'efficacité des réseaux de transport, tout en soulignant la nécessité d'approches adaptées et contextuelles.

Contexte

La presse en parle

Dans de nombreux journaux belges, le sujet de la vitesse sur les routes est abordé. En effet, en juin 2022, on pouvait lire dans les pages de « RTBF actus » que réduire la vitesse à 100 km/h sur les autoroutes aurait un impact écologique et économique. Ce sujet fût abordé dans un rapport du panel d'experts qui conseillent le gouvernement fédéral sur la manière de faire face à la crise énergétique. Il est appuyé dans cet article de presse que théoriquement en réduisant sa vitesse à 100 km/h sur les autoroutes, un automobiliste pourrait économiser jusqu'à 20€ pour 1000 kilomètres parcourus. Il est également avancé que cela conduirait à une circulation plus sûre et une diminution de la pollution sonore et environnementale (RTBF, 2022).

Dans l'article de la RTBF précédemment cité, le sujet tourne autour de la baisse de la limitation de vitesse sur nos autoroutes, cependant, d'autres articles de presse abordent le sujet différemment. C'est le cas dans le journal « Le Soir », qui se posait la question en 2023 de savoir s'il fallait augmenter à 150 km/h sur les autoroutes belges. Les arguments avancés par les défenseurs de cette mesure est qu'une vitesse autorisée plus élevée sensibiliserait les automobilistes à avoir une conduite plus sécuritaire. Cette idée provient des pays comme l'Italie où la vitesse autorisée est fixée à 130 km/h et pourrait passer à 150 km/h. Cependant, l'Institut VIAS répond que cette mesure n'est pas encore à l'ordre du jour car le réseau routier belge est très fréquenté et dangereux et qu'en plus de cela, une limitation fixée à cette vitesse augmenterait le différentiel de vitesse entre les camions et les voitures. (Le Soir, 2023).

Comme rapidement évoqué dans le paragraphe précédent, les limitations sur les autoroutes européennes ne sont pas uniformes. Dans le tableau suivant (Tableau 1), certaines limitations de vitesse de pays européens sont répertoriées.

On constate donc que les limitations de vitesse sur les autoroutes ne sont pas les mêmes pour les différents pays d'Europe. Cela peut être dû aux infrastructures, à la culture du pays, aux priorités politiques du pays. Il n'y a donc pas de « vitesse idéale » car sinon celle-ci serait appliquée sur toutes les autoroutes européennes. Cela est également vrai pour les limitations sur les différents autres axes routiers. Ces différentes limitations montrent que le choix de la vitesse sur les routes dépend de nombreux facteurs.

Tableau 1 : Limitations de vitesses sur les autoroutes européennes

Pays	Limitation de vitesse	Remarques
Allemagne	130 km/h	Pas de limitation sur certaines portions (recommandation de 130 km/h)
Belgique	120 km/h	
France	130 km/h	110 km/h sur certaines portions
Bulgarie	140 km/h	
Chypre	100 km/h	
Italie	130 km/h	
Norvège	100 km/h	

Rapport VIAS sur les mesures nationales de comportement en matière de vitesse

La vitesse revêt une importance capitale en ce qui concerne la sécurité routière car une vitesse excessive ou inappropriée est une cause majeure d'insécurité sur les routes. Elle impacte non seulement le risque d'accident, mais aussi sa gravité. Pour étudier cette question, l'institut Vias effectue régulièrement depuis 2003 des mesures nationales sur les comportements liés à la vitesse (VIAS Institute, 2021). Les résultats qui ressortent de leurs différents rapports sont donc fiables et représentatifs de la réalité au vu de leur expertise dans ce domaine.

Les données sur lesquelles les résultats de ce rapport sont basées tentent de n'être influencées par aucun facteur extérieur. En effet, ce rapport examine la vitesse des véhicules dans des conditions de "flux libre" ou de vitesse libre, cela implique des situations où la sélection de la vitesse est peu influencée par des éléments externes tels que la présence de dispositifs de ralentissement du trafic, de contrôles de vitesse, de virages, d'intersections, de passages piétons, de pentes abruptes, ainsi que par la distance par rapport au véhicule précédent. Les emplacements de mesure doivent ainsi satisfaire des critères rigoureux, ne tenant compte que des véhicules situés à une distance adéquate de celui qui les précède, afin de répondre au critère

de vitesse libre. La sélection des sites de mesures a été réalisée de manière aléatoire à partir d'une base d'échantillonnage couvrant toutes les routes de Belgique. Ensuite, le site le plus proche répondant aux critères a été sélectionné (VIAS Institute, 2021). Les comportements des conducteurs repris dans les mesures sont donc les plus « normaux » possibles et ne sont pas influencés par l'environnement extérieur.

Dans le tableau suivant (Tableau 2), les principaux résultats du rapport de l'institut VIAS sont résumés.

Tableau 2 : Résultats VIAS Institute

Limitation de vitesse	Vitesse moyenne
30 km/h	38,3 km/h
50 km/h	51,5 km/h
70 km/h	69,2 km/h
90 km/h	93,2 km/h
120 km/h	119,1 km/h

On constate, lors de la lecture de ce tableau, que les vitesses pratiquées sur les routes belges restent assez proches des limites imposées à l'exception des zones 30. Ces résultats sont valables pour les trois régions du pays. D'autres résultats du rapport de l'institut VIAS montrent que le pourcentage des conducteurs roulant trop vite varie entre 41% et 51% pour toutes les zones, à l'exception des zones 30 où le pourcentage de conducteurs roulant trop vite est de 77,6%.

Basé sur ces résultats, le Plan d'Action Fédéral pour la Sécurité Routière (2021) a établi des objectifs pour l'année 2030 concernant le respect des limitations de vitesse. L'un des principaux objectifs est de réduire de moitié le pourcentage de conducteurs dépassant les limites de vitesse. Pour les routes dont la limite est fixée à 30 km/h, l'objectif est de faire passer le pourcentage de conducteurs dépassant la vitesse autorisée de 78 % à 39 % d'ici 2030. Pour les routes limitées à 50, 70, 90 et 120 km/h, l'objectif est de maintenir le pourcentage de conducteurs dépassant la vitesse autorisée entre 21 et 27 %.

Durant la lecture de ce rapport, une question venant logiquement à l'esprit est la suivante : « Quel est l'impact d'une variation de limitation de vitesse sur un axe routier ? ». C'est un des points de départ de la question de recherche de ce mémoire. J'ai alors continué à explorer le rapport de l'institut VIAS (2021) et voici, selon ce rapport, les risques d'une vitesse excessive ou inadaptée :

- *en roulant plus vite, le conducteur doit traiter les informations en moins de temps (SWOV, 2021 ; Van den Berghe & Pelssers, 2020). Quand une trop grande quantité d'informations doit être traitée en peu de temps, le conducteur se concentre automatiquement sur celles qui apparaissent dans son champ de vision central et ce qui réduit la quantité d'informations qu'il perçoit dans le champ de vision périphérique (Rogers et al., 2005 ; SWOV, 2021) ;*
- *les autres usagers de la route ont moins de temps pour réagir face à un véhicule qui arrive vite (European Commission, 2021 ; Van den Berghe & Pelssers, 2020) ;*
- *la distance de réaction augmente (le temps de réaction du conducteur reste le même, mais la distance parcourue durant ce laps de temps est plus grande) (Van den Berghe & Pelssers, 2020) ;*
- *la distance de freinage augmente (SWOV, 2021 ; Van den Berghe & Pelssers, 2020) ;*
- *une vitesse plus élevée entraîne un impact plus important en cas de collision (Elvik, 2009 ; Elvik et al., 2019 ; SWOV, 2021 ; Van den Berghe & Pelssers, 2020).*

Un autre point qui a toute son importance lorsque l'on évoque le trafic routier est l'infrastructure du réseau. Chaque route a une fonction spécifique : connecter des lieux, favoriser les échanges, permettre l'accès à différents endroits ou une combinaison de ces objectifs. Une route explicite doit clairement communiquer au conducteur sa fonction, les potentiels dangers, le comportement attendu, etc. Les conducteurs responsables adopteront naturellement le comportement et la vitesse appropriés, même en l'absence de panneaux de signalisation, grâce à une bonne compréhension de la route. Cependant, cela ne suffit pas à influencer le comportement des conducteurs qui choisissent délibérément de ne pas respecter les règles de conduite. Les routes explicites se distinguent tout d'abord par un aménagement adapté à leur fonction spécifique. Cet aménagement englobe divers aspects tels que l'éclairage, la gestion des priorités, la signalisation, le marquage au sol et les matériaux utilisés. Lorsque tous ces éléments sont cohérents, les usagers reconnaissent le type de route et savent comment se comporter en conséquence (VIAS Institute, 2021). L'environnement dans lequel l'automobiliste va évoluer va donc avoir un impact important sur son comportement au volant et sa manière de réagir.

Motivations

Une des principales motivations pour réaliser mon mémoire dans ce domaine est due à la majeure que j'ai choisie en Master 1. En effet, durant l'année scolaire 2022 – 2023, j'ai effectué une majeure intitulée « Transportation Management and Supply Chain ». Durant celle-ci, j'ai fortement apprécié les cours de « Transport et mobilité » et « Modélisation de réseaux de transport ». Ces cours m'ont permis d'en apprendre davantage sur l'offre et la demande des transports, d'évaluer des politiques de transport et mobilité, « modéliser » et comprendre les réseaux de transport. Etudier toutes ces matières m'a donné envie de réaliser un mémoire dans le domaine des réseaux de transport. Il est important de préciser que les infrastructures routières et les décisions qui gravitent autour de celles-ci ont un impact économique certain. Elles permettent des liaisons commerciales importantes et essentielles pour le transport de marchandises et de personnes. Cela permet notamment une amélioration de la compétitivité internationale car des réseaux de transport modernes et optimaux contribuent à la croissance économique d'un pays. Se pencher sur un travail qui touche à une telle importance économique est une réelle source de motivation.

De plus, comme souligné plus tôt dans ce travail, la limitation de vitesse sur le réseau routier est un sujet récurrent dans la presse belge et étrangère. Je désirais donc travailler sur ce thème afin d'obtenir un avis objectif. Etant un conducteur depuis 6 années je me demandais également quels seraient les impacts des variations de limitation de vitesse et est-ce que ces variations ont une utilité. J'espère, à travers ce mémoire, donner une ébauche de réponse à cette problématique qui pourrait aider le gouvernement et les preneurs de décisions sur les limitations de vitesse. Le fait de pouvoir éventuellement contribuer de manière efficace à l'optimisation des décisions en termes d'infrastructures routières belges est également quelque chose de très motivant. J'ose espérer que mes recherches auront un impact dans les domaines tels que la pollution, la congestion, la sécurité, la fluidité du trafic,

Enfin, après diffusion des sujets de mémoires proposés par les différents promoteurs, je me suis penché sur les sujets qui se rapprochaient le plus du domaine dans lequel je souhaitais réaliser le mien. Je me suis alors penché sur un sujet se rapportant aux modèles multi-agents et c'est à partir de ce moment que je me suis rendu compte de l'attractivité de ces modèles. Travailler à l'aide de telles approches est à la fois captivant et complexe, ce qui rend mon travail sur ce mémoire intéressant.

Evaluation de l'impact de la vitesse et méthodologies

De nombreux travaux ont déjà été réalisés dans but d'estimer et d'évaluer l'impact de la vitesse sur les réseaux routiers. Dans chacun de ces travaux, des méthodologies différentes ont été explorées. Analyser les documents traitant ce sujet semble être une bonne base de comparaison pour les résultats qui seront établis à la fin de mon mémoire. Cela va permettre d'avoir une perception des méthodologies qui ont déjà été utilisées pour répondre à la problématique de la vitesse. Dans de nombreux cas, la vitesse est synonyme de mortalité. Grâce à la présentation des études suivantes, il sera possible d'évaluer l'impact de la vitesse et les facteurs qui y sont associés.

Mesurer l'impact sur la sécurité routière d'une modification de la limite de vitesse sur le réseau routier

L'objectif du travail réalisé par Marie-Soleil Cloutier et ses collaborateurs en 2019, à la demande du ministère des Transports du Québec, est d'évaluer les conditions de sécurité après une modification de limite de vitesse. Dans le rapport de Cloutier (2019), les résultats sont orientés sur la sécurité routière et plus particulièrement sur les collisions et les variables qui y sont associées. Les résultats obtenus dans ce projet réalisé au Québec sont basés sur une diminution de la limitation autorisée sur un segment routier. Il ressort de ce rapport qu'une réduction de la limitation de vitesse marque une tendance à la baisse des collisions sur un axe routier. Cependant, cela ne signifie pas que les vitesses pratiquées ont changé. Cela signifie concrètement que malgré une diminution de la limitation de vitesse, les vitesses pratiquées par les automobilistes n'ont que faiblement diminué. Il y est également constaté que la proportion de conducteurs en infractions diminue en cas d'augmentation de la limite de vitesse et augmente en cas de diminution de celle-ci. Autrement dit, plus la réduction de vitesse est grande, plus les vitesses moyennes diminuent, mais plus les proportions de contrevenants sont grandes. Les comportements des conducteurs s'adaptent lors d'un changement de vitesse, mais cela ne garantit pas nécessairement le respect des nouvelles limites. L'impact des changements de limitation de vitesse dépend de la vitesse initiale et du différentiel de la nouvelle limite. Plus la différence est grande, plus l'effet est marqué, que ce soit pour réduire ou augmenter les collisions et la vitesse pratiquée. Certaines combinaisons de limites de vitesse précédentes avec le différentiel de vitesses avant et après montrent de « meilleurs résultats » (exemple : vitesse antérieure à 90 km/h avec une réduction de 20 km/h) (Cloutier, 2019).

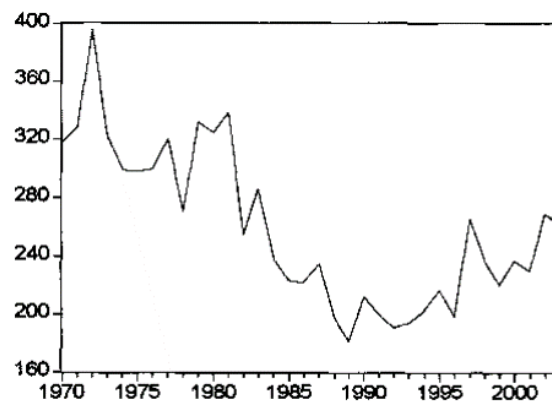
D'autres résultats de cette étude montrent que l'environnement routier joue un rôle important dans la sécurité. En effet, à mesure que les DJMA (débit journalier moyen annuel) augmentent et que les segments de routes s'allongent, le nombre de collisions ou la probabilité d'augmentation de collisions s'accroît, peu importe que la vitesse autorisée ait augmenté ou diminué. Si les segments de route sont unidirectionnels, cela réduit la probabilité de collisions (Cloutier, 2019).

Approche économique et institutionnelle des limitations de vitesse : les enseignements du Montana

Cette étude qui est portée sur l'analyse de l'évolution des limites de vitesse avec la suppression puis la réinstauration de limites de vitesse numérique est un cas exemplaire où l'approche économique et institutionnelle démontre son utilité. Une étude réalisée au Montana sur l'évolution de la limitation de vitesse avec une grande variabilité de la vitesse ne correspond pas aux effets d'accidentologie attendus. En effet, l'imposition de limites de vitesse plus strictes n'a pas apporté une amélioration au niveau du nombre de décès, tandis que la levée de la limite de vitesse n'a pas augmenté le nombre de victime de la route (Carnis, 2006).

La méthodologie suivie dans cette étude est la suivante, sur la période antérieure à 1974, la « Basic rule » (BR) était d'application sur le réseau routier. C'est-à-dire que le conducteur doit adopter une vitesse raisonnable et responsable en fonction des conditions de conduites qui se présentent à lui (il n'y a pas de limite de vitesse numérique). Ensuite, entre 1974 et 1995, des limites de vitesse sont instaurées successivement : 55 mph et 65 mph. En 1995, la limitation de vitesse retourne à la « Basic rule » jusqu'en 1999 où les législateurs instaurent la limite à 75 mph. Lorsque les limites de vitesse sont mises en place, elles sont toujours accompagnées de vitesses numériques (hormis durant les périodes où la BR est d'application (Carnis, 2006).

Figure 1 : Evolution du nombre de tués de l'Etat du Montana entre 1970 et 2003



Le graphique de la Figure 1 montre que la mise en vigueur de limitations de vitesse n'est pas synonyme d'une baisse de la mortalité et que la mise en place de la « Basic rule » ne signifie pas pour autant une augmentation du nombre de décès. Plusieurs pistes interprétatives peuvent être envisagées, la première est que l'environnement routier du Montana est composé d'importantes distances et que la limitation de vitesse paraissait inadaptée aux spécificités du réseau routier. La grande liberté dont les habitants jouissent est également un facteur important, car ceux-ci ont l'habitude de conduire comme ils l'entendent, la mise en place d'une limitation de vitesse a donc provoqué une certaine rébellion de la part de la population. Ces oppositions politiques et institutionnelles constituaient un véritable obstacle à la mise en place d'une nouvelle réglementation qui ne bénéficiait d'aucun soutien (Carnis, 2006).

Est-ce que la limitation de vitesse à 80 km/h sauve des vies en France ?

En 2018, les autorités françaises ont décidé d'introduire une nouvelle limitation de vitesse. Ils ont réduit la vitesse à 80 km/h sur le réseau interurbain (initialement 90 km/h). Cette décision a été prise dans le but de diminuer le nombre d'accidents mortels sur ce réseau routier. Grâce à différentes méthodes économétriques, une étude montre que cette diminution de vitesse a permis une réduction de 10% de la mortalité sur le réseau interurbain français (Carnis, 2023).

La littérature montre, dans la grande majorité des cas, hormis l'exception vue plus tôt du cas du Montana, qu'une vitesse élevée rend la prise de décision du conducteur plus lente et moins efficace face aux risques et que plus la vitesse est élevée, plus les blessures liées aux accidents

sont graves. Pour analyser l'impact de la diminution de la limitation de vitesse à 80 km/h en France, une étude a été menée grâce à la méthode de série temporelle appelée « SARIMA ». C'est-à-dire, "Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average", qui a des périodicités entre les observations. C'est un modèle statistique utilisé pour modéliser et prévoir les séries temporelles qui présentent à la fois des tendances saisonnières et non saisonnières. (Carnis, 2023).

L'impact estimé global grâce au modèle « SARIMA » indique que la diminution de la vitesse apporte un impact positif significatif. En effet, il illustre le fait que 300 à 350 vies peuvent être sauvées avec une réduction de la limite de vitesse à 120 km/h. La réduction du nombre de décès sur le réseau interurbain français est entre 8,5% et 12%. Cela confirme également qu'il est toujours possible de réduire la vitesse lorsque des mesures publiques volontaires sont adoptées. C'est-à-dire que des initiatives prises par les autorités publiques, sans contraindre la population peuvent avoir un impact positif sur la réduction de la vitesse (Carnis, 2023).

Premières réflexions

Il est donc raisonnable de conclure que la mise en place d'une limitation de vitesse doit être décidée en fonction des contraintes économiques et institutionnelles. La réglementation et son application doivent être en cohérence avec leur environnement. Si ce n'est pas le cas, la réduction de la limitation de vitesse peut ne pas être efficace et ne va pas réduire le taux de mortalité, c'est ce qui ressort de l'étude de Carnis (2006) réalisée au Montana. Dans d'autres circonstances, la littérature montre que lorsque la vitesse est réduite sur un axe routier, le nombre de décès diminue lui aussi. Il est donc nécessaire de prendre plusieurs facteurs en compte lors de la mise en vigueur d'une nouvelle limitation de vitesse. Les facteurs peuvent être environnementaux (caractéristiques du réseau routier et des éléments extérieurs), relatifs aux croyances des conducteurs (ils peuvent ne pas accepter les nouvelles règles) ou encore relatifs aux comportements des différents conducteurs sur le réseau.

Suite à l'analyse de ces différentes études, il semblerait que pour répondre à la question de recherche sur laquelle est basée ce mémoire, l'utilisation d'un modèle qui va simuler le trafic routier en prenant compte des différents intervenants qui interagissent sur la route sera nécessaire. Dans ce cadre, le modèle multi-agents va être développé dans la suite de ce travail.

Simulation de trafic routier

Dans cette partie sera développée une description du réseau routier et du contexte de simulation de trafic routier. Le but est de poser les cadres de la simulation utilisée afin d'assurer une compréhension optimale.

Définition du trafic routier

Il est possible de décrire le trafic routier comme étant le processus de transport depuis une origine et vers une destination par le moyen des infrastructures routières. Le trafic routier résulte alors de la somme des comportements individuels des usagers cherchant à rejoindre chacun leur destination, depuis leur point d'origine sur le réseau donné (Costeseque, 2013).

Le trafic routier représente un phénomène complexe pour diverses raisons. Il implique une multitude d'acteurs répartis sur de vastes zones géographiques, avec un nombre fluctuant d'utilisateurs évoluant dynamiquement dans le temps. À mesure que le nombre de participants du système augmente, le nombre d'interactions augmente également. La complexité du modèle est donc inégale et aléatoire. De plus, les objectifs des utilisateurs ne sont pas toujours compatibles les uns avec les autres et un certain nombre de facteurs ne sont pas contrôlables ni par les opérateurs ni par les usagers de la route, on peut citer par exemple l'état de la route comme élément incontrôlable (Mastio, 2017).

En Belgique comme dans les autres pays, les raisons pour lesquelles le réseau routier existe sont multiples et varient en fonction du contexte géographique, économique, social et culturel. Le trafic routier est principalement alimenté par le besoin fondamental des individus de se déplacer d'un endroit à un autre pour diverses raisons notamment pour satisfaire une demande commerciale mais aussi pour répondre aux déplacements domicile-travail et aux migrations de population. Les déplacements sont indispensables pour maintenir les activités économiques et sociales en cours (Ksontini, 2013). La hausse de la population et des activités qui sont présentes dans les zones urbaines a conduit à une demande croissante des déplacements, cela génère naturellement un trafic routier de plus en plus important. En Belgique, comme dans de nombreux pays occidentaux, on observe une forte dépendance à la voiture individuelle pour les déplacements quotidiens (maison-travail). Cette dépendance est souvent liée à des facteurs comme la dispersion des zones d'habitation, la disponibilité limitée des transports en commun

dans certaines régions mais également la commodité apportée avec la voiture privée. Dans certains pays, comme en Belgique, bien que disposant d'un réseau routier avec des infrastructures relativement bien développées, divers problèmes peuvent être constatés. On peut par exemple citer la congestion qui est due en partie à l'infrastructure. De plus, la Belgique, ayant une position centrale en Europe, est traversée par un flux important de transit de marchandises et de personnes.

Simulation

La simulation va avoir pour objectif de décrire la dynamique des systèmes complexes et tester différents scénarios grâce à des outils informatiques (Costeseque, 2013). Les modèles de simulation partagent des caractéristiques communes en ce qui concerne les données requises en entrée et celles générées en sortie. Ils nécessitent en entrée un réseau routier ainsi qu'une demande de trafic, et produisent en sortie des données statistiques ainsi qu'une représentation graphique visuelle. Les résultats numériques décrivent de manière quantitative et qualitative les flux de véhicules pendant la simulation. Les modèles de simulation de trafic se présentent sous différentes formes pouvant être classées selon divers critères : la granularité, le temps, la part d'aléatoire dans le modèle et le type d'approche utilisé (Ksontini, 2013).

Niveau de granularité

Il est possible de distinguer trois niveaux de granularités : microscopique, mésoscopique et macroscopique. Ces niveaux de granularité vont définir le niveau de détail avec lequel est représenté le système à étudier. Le niveau macroscopique est utilisé pour l'analyse sur de grandes zones urbaines ou encore sur le réseau routier national. Cette taille de modèle peut par exemple aider à étudier la demande de transport dans une région donnée (Figure 2).

Figure 2 : Niveau macroscopique



Les modèles de simulation microscopiques (Figure 3) permettent une approche plus détaillée du trafic. Ils visent à reproduire le comportement individuel de chaque « couple » véhicule/conducteur. Ce type de modèle vise à se rapprocher autant que possible du comportement réel des conducteurs. Afin d'accomplir cette tâche, ces modèles tentent de simuler la manière dont un véhicule réagit en fonction de son environnement, qui est composé de l'infrastructure routière et les autres véhicules présents à proximité. (Ksontini, 2013). Un exemple d'utilité de modèle de cette taille peut être l'étude de l'installation d'un nouveau feu rouge.

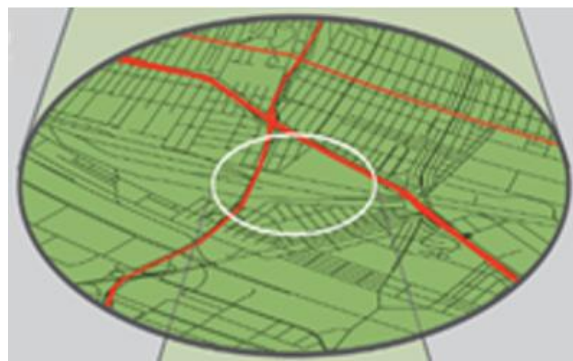
Figure 3 : Niveau microscopique



À l'échelle mésoscopique (Figure 4), on se concentre sur des groupes de véhicules ou sur des sections de routes plutôt que sur des véhicules individuels. Les modèles de trafic mésoscopiques examinent le flux de trafic dans des zones spécifiques, telles que des quartiers urbains ou des

intersections importantes. À mi-chemin entre les modèles macroscopiques et microscopiques, ces approches capturent les déplacements à un niveau microscopique tandis que les flux de trafic sont représentés à une échelle macroscopique. Elles reposent ensuite sur une description des véhicules sous la forme de groupes ou paquets de véhicules (Emery, 2016). Une situation dans laquelle un modèle à taille mésoscopique peut être utilisé est par exemple le plan « Good Move » qui a été initié à Bruxelles en 2022.

Figure 4 : Niveau mésoscopique



Représentation du temps

La simulation de trafic repose sur une gestion minutieuse du temps, qui caractérise les déplacements routiers. En effet, le temps constitue une dimension fondamentale de la simulation, mais aussi un critère qui permet de classer les outils utilisés à cet effet. Il est possible de distinguer deux différentes représentations du temps : le temps discret et le temps continu.

Dans les modèles à temps continus, les composants du système évoluent constamment dans le temps en réponse à des stimuli discrets ou continus. Cette approche, bien que plus proche de la réalité, est souvent difficile à implémenter sur un ordinateur en raison de sa complexité. En revanche, les modèles à temps discrets considèrent que les changements d'état du système se produisent à des moments précis dans le temps.

Il existe deux principales catégories de modèles à temps discrets : les simulations à événements discrets et les simulations à temps discrets segmentés. Dans les simulations à événements discrets, les changements d'état du système sont déclenchés par des événements spécifiques, tels que le passage d'un feu de signalisation au vert. En revanche, les simulations à temps discrets segmentés divisent le temps en intervalles égaux, appelés "pas de temps" ou "pas de

simulation". À chaque « pas de temps », le modèle réévalue les différents états et variables du système (Ksontini, 2013).

L'aléatoire de la simulation

L'aléatoire dans la simulation de trafic est indispensable pour rendre les modèles aussi réalistes que possible et pour capturer la complexité qui est liée aux systèmes de transport. L'aléatoire permet de modéliser des comportements imprévisibles, des événements spontanés et des variations naturelles qui impactent le trafic routier de manière significative.

L'aspect stochastique est utilisé pour représenter la variabilité et l'imprévisibilité du comportement des conducteurs. Des décisions comme le choix d'itinéraire ou la vitesse de conduite peuvent être influencées par une multitude de facteurs aléatoires tels que les conditions météorologiques, les distractions ou encore l'état émotionnel du conducteur. Intégrer ces aspects aléatoires permet d'obtenir des modèles plus réalistes et de mieux anticiper les comportements imprévus lors de la simulation. De plus, l'aléatoire est souvent utilisé pour générer des flux de trafic synthétiques dans les modèles de simulation. En injectant des variations aléatoires dans les volumes de trafic, les heures de pointe, les caractéristiques des véhicules, etc., les simulateurs peuvent reproduire une grande diversité de scénarios réalistes.

En résumé, l'incorporation de l'aléatoire dans la simulation de trafic est essentielle pour reproduire la complexité et l'incertitude du monde réel. Cela permet d'améliorer la précision des modèles, de mieux anticiper les situations imprévues et de concevoir des infrastructures routières et des stratégies de gestion du trafic plus efficaces et résilientes.

Modélisation comportementale de la tâche routière

Utiliser des modèles fondés sur l'approche comportementale va permettre de s'intéresser aux différents acteurs de la situation et à leurs interactions plutôt que de modéliser le trafic comme étant un flux. Ce type de modélisation est possible avec une granularité microscopique (voire mésoscopique). On ne reproduit pas le trafic, il se produit lui-même. Le véhicule au sein de la simulation va s'adapter en permanence au contexte routier qui l'entoure.

Il est important que la simulation du modèle soit cohérente et plausible par rapport à la réalité. Pour se faire, il faut reproduire la tâche de conduite de chaque conducteur de manière réaliste.

L'activité de conduite peut être considérée comme un ensemble de tâches (séquentielles ou parallèles). Le conducteur réagit et s'adapte à l'environnement qui l'entoure. Il existe trois niveaux de prise de décision dans la littérature. Au niveau stratégique, il s'agit de planifier le déplacement de l'individu, incluant l'itinéraire et la durée du trajet. Le niveau tactique implique la prise de décision concernant les changements de trajectoire, les traversées d'intersections, etc. Le niveau opérationnel concerne les actions de conduite de bas niveau, telles que l'utilisation du volant et des pédales, qui mettent en œuvre les décisions prises aux niveaux supérieurs. Comme mentionné précédemment, l'approche comportementale accorde une importance particulière à la prise en compte de l'individu dans la modélisation. Pour cela, les modèles de simulations multi-agents permettent de simuler les acteurs du système par des agents qui sont autonomes et qui interagissent entre eux. Ces modèles tiennent compte du contexte et de la prise de décision, ce qui les rend plus réalistes (Ksontini, 2013).

Approche multi-agents

Concept

Le paradigme multi-agents, issu de la recherche sur l'intelligence artificielle distribuée, une sous-catégorie de l'intelligence artificielle, constitue un domaine d'étude qui a émergé avec Ferber (1995) pour offrir une alternative aux méthodes analytiques traditionnellement utilisées. Cependant, l'intelligence artificielle a rapidement rencontré divers obstacles, principalement liés à la nécessité d'intégrer, au sein d'une même base de connaissances, l'expertise, les compétences et les connaissances provenant d'individus différents qui, dans la réalité, communiquent et collaborent pour atteindre un objectif commun (Ksontini, 2013).

Plutôt que de tenter de décrire la réalité dans son ensemble à travers des équations, l'approche multi-agents se concentre sur le comportement des petites entités, appelées agents. Ces entités possèdent une certaine autonomie et évoluent dans un environnement avec lequel elles interagissent. En général, un agent possède un ensemble d'objectifs à atteindre, ainsi que des compétences et des ressources qui lui sont propres (Ferber, 1995). En raison de la diffusion croissante de l'information en temps réel aux voyageurs, la prévision du comportement des réseaux de transport modernes devient de plus en plus complexe. Face à ce défi, la simulation multi-agents, qui se focalise sur l'individu, s'impose comme l'un des outils les plus intéressants pour la conception et la mise en œuvre de solutions dans le domaine de la simulation de trafic routier.

Agents

Selon Ferber (1995), un agent peut être défini comme suit : Un agent représente une entité réelle ou virtuelle qui interagit dans un environnement, capable de le percevoir et d'agir sur celui-ci, avec la capacité de communiquer avec d'autres agents. Il manifeste un comportement autonome, résultant de ses connaissances, de ses interactions avec d'autres agents et des objectifs qu'il poursuit (Figure 5).

On désigne par le terme "agent" une entité, physique ou virtuelle, qui (Ferber, 1995) :

- a. Est capable d'agir dans un environnement,
- b. Peut communiquer directement avec d'autres agents,

- c. Est animée par un ensemble de tendances, exprimées sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser,
- d. Possède des ressources propres,
- e. Est capable de percevoir son environnement de manière limitée,
- f. Dispose généralement d'une représentation partielle, voire aucune, de son environnement,
- g. Possède des compétences et offre des services,
- h. Peut éventuellement se reproduire,
- i. A pour comportement tendant à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, ainsi que de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

Figure 5 : Relation entre les agents et l'environnement



Chaque agent prend des décisions de manière individuelle, suivant un cycle de trois phases : perception, décision et action. Durant la phase de perception, l'agent va pouvoir acquérir des informations de son environnement. Parfois, l'agent construit une représentation symbolique de cet environnement ou la met à jour en fonction des informations perçues. La décision implique un processus de raisonnement où l'agent planifie les actions à entreprendre pour atteindre ses objectifs. Enfin, la phase d'action correspond à la mise en œuvre concrète des décisions prises précédemment (Ksontini, 2013).

Environnement

Comme précisé plus tôt dans ce travail, des travaux dans différents domaines tentent de démontrer l'importance de l'environnement dans le cadre des réseaux routiers et surtout dans les systèmes multi-agents.

L'environnement joue un rôle crucial dans la modélisation des systèmes multi-agents, en définissant le cadre dans lequel les agents interagissent. Sa composition varie en fonction de l'application considérée. Dans les simulations, l'environnement peut être soit celui de la simulation, fournissant l'infrastructure pour son exécution, soit celui simulé, une partie du modèle dans laquelle les objets peuvent être perçus, manipulés et modifiés par les agents du système (Weyns et al., 2005).

L'environnement, dans le contexte de simulation de trafic, représente l'infrastructure de transport et exerce un rôle crucial dans la formation du trafic routier. Il synthétise les conditions de circulation à travers des caractéristiques générales spécifiques aux infrastructures de transport, telles que la vitesse de déplacement, la hiérarchie du réseau routier, la capacité, etc. Cette composante spatiale fixe du système multi-agents offre la possibilité de définir les paramètres de circulation des véhicules routiers ainsi que des agents en se référant à leurs caractéristiques détaillées telles que la direction et la vitesse de déplacement, la configuration et la distribution du trafic routier sur les voies de circulation, et d'autres éléments similaires. Le réseau routier va donc être « l'environnement » dans lequel les agents vont évoluer lors de la simulation du trafic.

Gestion du temps

La simulation multi-agents implique des entités interagissant selon un modèle de communication. Deux principales catégories de gestion du temps sont distinguées : la simulation à événements discrets et la simulation continue. Dans la première, la mise à jour se fait à chaque événement discret, tandis que dans la seconde, le temps est divisé en intervalles réguliers et l'état du système est examiné à chaque pas de temps. La granularité de l'observation affecte la précision et la durée de la simulation. Le choix entre un modèle stochastique et déterministe dépend de la variabilité souhaitée dans les résultats (Ksontini, 2013).

Interaction

Pour un agent, l'interaction avec un autre représente à la fois la source de sa puissance et l'origine de ses problèmes. En effet, la coopération entre agents permet d'accomplir davantage que la simple somme de leurs actions, mais la multiplicité des agents nécessite également la coordination de leurs actions et la résolution de conflits. Une interaction se définit comme une relation dynamique entre deux agents ou plus, se manifestant à travers leurs actions réciproques. Ces interactions, formant un ensemble, sont à l'origine de l'émergence d'un comportement global. Elles se matérialisent par une série d'actions appliquées aux agents, soumises à des conditions d'activation, et exercent ainsi une influence sur le comportement ultérieur des agents (Ferber, 1995).

Ferber et ses collaborateurs (Ferber et al., 2009) distinguent deux catégories de systèmes d'interactions, à savoir l'interaction centrée sur les agents et l'interaction basée sur l'environnement. Dans la première catégorie, les interactions servent de moyen de communication entre les agents, se caractérisant généralement par une communication directe à travers des échanges de messages. Dans la seconde, on évoque plutôt le comportement que les agents vont adopter au vu de l'environnement dans lequel ils évoluent.

Modèles multi-agents existants

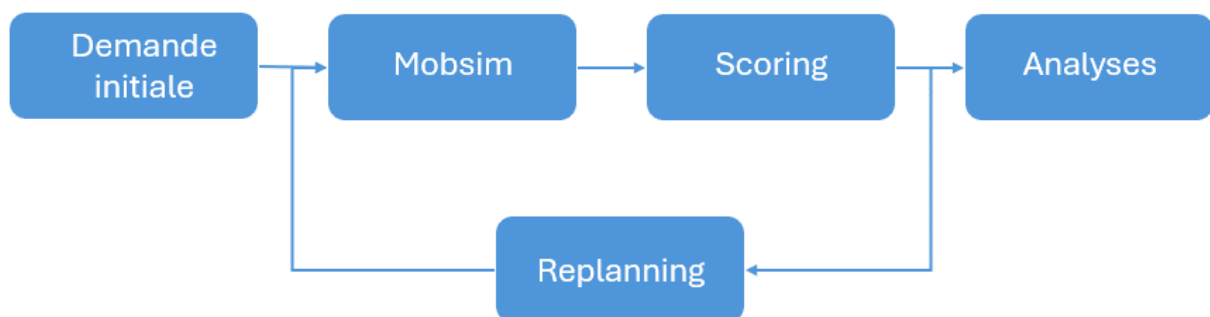
Des nombreux travaux se sont déjà penchés sur les modèles multi-agents. Le but de ce chapitre va être de passer en revue certains modèles existants afin d'ancrer de manière la plus complète possible mon travail dans l'état de l'art en ce qui concerne la modélisation multi-agents.

MATSim (The Multi-Agent Transport Simulation)

Il est impératif de citer la simulation MATSim (The Multi-Agent Transport Simulation) lorsque l'on évoque les modèles multi-agents. MATSim est un cadre logiciel open-source utilisé pour simuler le comportement des transports à grande échelle. Il est basé sur une approche « agent based », où chaque agent représente un individu qui prend des décisions de transport en fonction de ses propres attributs et de son environnement. MATSim permet la simulation microscopique du trafic routier (Horni et al., 2016).

L'algorithme MATSim fonctionne en suivant un cycle itératif, composé de plusieurs étapes, qui se trouve dans la boucle de la Figure 6.

Figure 6 : Boucle MATSim



Il commence par la demande initiale découlant des chaînes d'activités quotidiennes de la population de la zone d'étude. Durant les différentes itérations, la demande initiale est optimisée par chaque agent du système. Chaque agent possède une mémoire contenant un nombre fixe de

plans journaliers, où chaque plan est composé d'une chaîne d'activités quotidiennes et d'un score associé. Le score peut être interprété comme une utilité économétrique. Dans chaque itération, avant la simulation du chargement du réseau avec le mobsim de MATSim, chaque agent sélectionne un plan de sa mémoire. Cette sélection dépend des scores des plans, qui sont calculés après chaque exécution de mobsim, en fonction des performances des plans exécutés. La modification du plan est effectuée par les modules de replanification. Quatre dimensions sont généralement prises en compte pour MATSim à l'heure actuelle : l'heure de départ (et implicitement, la durée de l'activité), l'itinéraire, le mode et la destination. La replanification de MATSim offre différentes stratégies pour adapter le plan, allant de la mutation aléatoire à des suggestions approximatives, jusqu'à l'obtention de meilleures réponses où, à chaque itération, le choix actuellement optimal est recherché. Si un agent se retrouve avec trop de plans (configurables), le plan avec le score le plus bas (configurable) est retiré de la mémoire de l'agent. Les agents qui n'ont pas subi de replanification choisissent entre les plans existants. Le modèle de sélection est configurable dans de nombreuses enquêtes MATSim, un modèle générant une distribution logit pour la sélection du plan est utilisé. Une itération est achevée en évaluant les expériences des agents avec les plans journaliers sélectionnés (scoring). Le processus itératif est répété jusqu'à ce que le score moyen de la population se stabilise, c'est-à-dire jusqu'au moment où les individus ne sont plus incités à modifier leurs itinéraires. Comme MATSim est conçu pour des scénarios à grande échelle, il adopte une approche basée sur les files d'attente, qui est efficace en termes de calculs. Lorsqu'une voiture entre dans un segment du réseau à partir d'une intersection, elle est ajoutée à la fin de la file d'attente. Elle y reste jusqu'à ce qu'elle soit en tête de la file d'attente et jusqu'à ce que le segment suivant permette l'entrée (Horni et al., 2016).

« The MATSim Open Berlin Scenario » est une illustration de l'utilisation de MATSim dans un contexte concret. "The MATSim Open Berlin Scenario" présente un scénario de simulation de transport basé sur la ville de Berlin en Allemagne, développé dans le cadre du projet MATSim. Ce scénario fournit une représentation détaillée du réseau de transports de Berlin, y compris les routes, les transports en commun, les itinéraires cyclables et piétonniers, ainsi que les caractéristiques socio-économiques de la population. Ce scénario se distingue par son utilisation exclusive de données « open source » et par la création d'une demande de transport entièrement synthétique. De plus, la procédure de génération de scénarios est spatialement transférable, ce qui facilite la création de scénarios de simulation de transport basés sur des agents pour d'autres régions. Il permet aux chercheurs et aux planificateurs de simuler et d'analyser divers scénarios

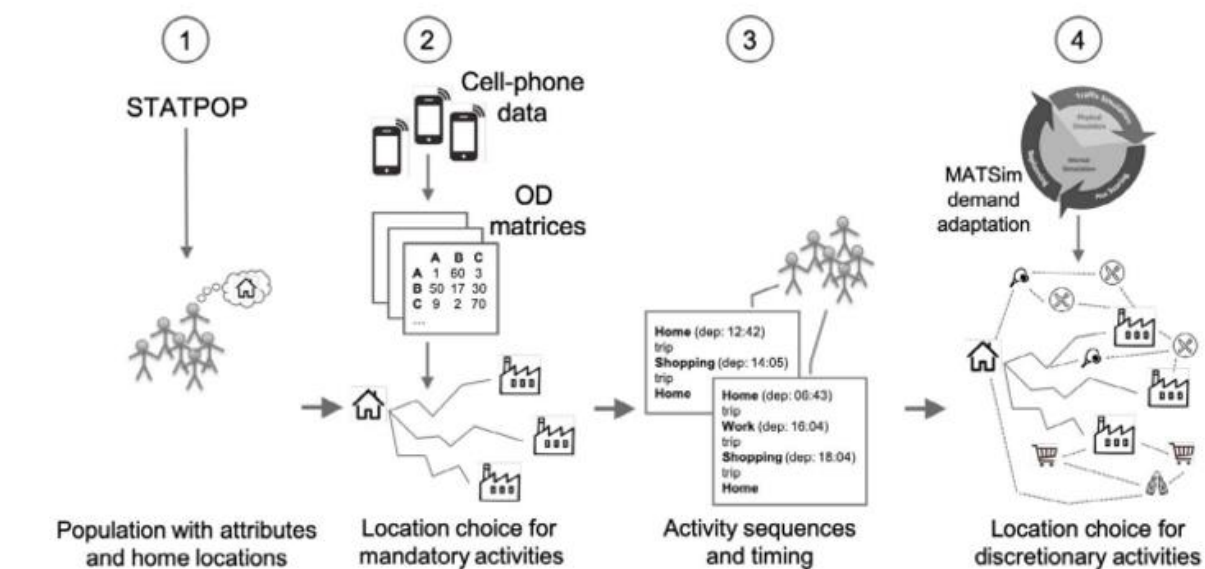
de transport, d'évaluer l'impact de politiques de transport et d'urbanisme et de prendre des décisions éclairées en matière de planification urbaine et de mobilité (Ziemke et al., 2019).

En résumé, les étapes itératives de l'algorithme MATsim permettent de simuler le comportement des transports de manière réaliste et détaillée. Les résultats de la simulation peuvent être utilisés pour analyser les systèmes de transport et pour développer des politiques de transport plus efficaces.

Une approche efficace pour créer des scénarios de simulation de transport basée sur le « Big Data »

En 2020, Ziemke et ses collaborateurs ont présenté une nouvelle méthode efficace pour créer des scénarios de simulation de transport basés sur le « Big Data » (mégadonnées) qui est omniprésent à l'heure actuelle. Les auteurs proposent une approche innovante qui utilise ces grandes masses de données pouvant provenir de diverses sources telles que les données de téléphonies mobiles, les données de paiements électroniques ou encore les données des réseaux sociaux, dans le but de créer des scénarios de transport réalistes. Cette approche prend en compte les comportements des individus, les préférences et les schémas d'activités pour générer des scénarios de simulation précis. Le processus de création d'un scénario de simulation de transport se déroule en quatre étapes suivantes (Figure 7) : création d'une population (1), utilisation de matrices d'origine-destination basées sur les téléphones portables pour déterminer le lieu de travail et d'éducation pour tous les membres de la population qui sont des travailleurs ou participent au système éducatif (2), application d'un nouveau modèle de planification d'activités aspatial (non lié à l'espace) avec des exigences d'entrée de données relativement frugales (modestes) (3) et exploitation des capacités d'adaptation de la demande de MATSim, notamment la sélection des lieux pour les activités discrétionnaires (non essentielles) (4) (Ziemke et al., 2020).

Figure 7 : Nouveau processus de création efficace de scénarios de simulation de transport basé sur les données de demande de téléphonie mobile



Plateforme de simulation

Choix de la plateforme de simulation

La simulation d'un problème spécifique est très compliquée à réaliser, ce qui rend impossible la création d'un outil de simulation multi-agents capable de modéliser directement n'importe quelle situation. Cependant, la majorité des simulateurs de trafic partagent un ensemble de caractéristiques communes. Pour cette raison, de nombreuses plateformes multi-agents généralistes ont été développées par les chercheurs. Leur objectif est de faciliter la création de nouveaux modèles en prenant en charge les fonctionnalités basiques pour tous les simulateurs, comme la communication entre les agents, la gestion de leur cycle de vie, de leur perception et de l'environnement en général. Ces plateformes incluent souvent une interface graphique permettant de visualiser le déroulement de la simulation (Mastio, 2017).

Dans la littérature, on trouve une variété d'outils de simulation couvrant diverses problématiques, allant de la prévision des congestions à l'assistance de la conception, en passant par l'évaluation des impacts du trafic sur la qualité de l'air. Ces outils sont catégorisés selon le degré de précision dans la modélisation du flux de circulation. Tous répondent à des besoins spécifiques. Comme dit précédemment, nous pouvons distinguer deux types d'échelles de simulation : microscopique et macroscopique. Une troisième échelle, appelée mésoscopique, peut également être utilisée.

Dans le cadre de ma recherche, la granularité la plus adéquate est la microscopique. Celle-ci est la plus appropriée car un des buts de ma recherche va être de décrire les conséquences de phénomènes impactant les utilisateurs individuels. Etant donné que je vais tenter de mesurer l'impact d'une variation de vitesse sur un axe routier, cela comprend de décrire les conséquences que cela va avoir sur les utilisateurs individuels.

L'outil qui va être utilisé pour réaliser les analyses de ce mémoire se nomme SUMO pour Simulation of Urban MObility. Cet outil mobilise les aspects nécessaires pour la suite de ce travail. En effet, SUMO permet une simulation de trafic open source à l'échelle microscopique, échelle avec laquelle il est le plus adéquat de travailler pour la question de recherche de ce travail. L'application va être décrite avec plus de précision dans la section suivante.

Présentation de SUMO

SUMO est une suite de simulation de trafic gratuite et open source. Disponible depuis 2001, elle permet la modélisation de systèmes de trafic intermodaux, incluant les véhicules routiers, les transports en commun et les piétons. SUMO est accompagné d'une multitude d'outils de support qui automatisent les tâches essentielles pour la création, l'exécution et l'évaluation des simulations de trafic, tels que l'importation de réseaux, le calcul d'itinéraires, la visualisation et le calcul d'émissions.

Ce logiciel multi-plateforme de simulation de trafic multimodal prévu pour l'échelle microscopique et est conçu pour gérer de grands réseaux. SUMO est employé dans divers contextes de recherche, notamment pour la prédiction du trafic, l'analyse des feux de signalisation, le choix des itinéraires, ainsi que dans le domaine des systèmes de communication véhiculaire. Les utilisateurs de SUMO ont la possibilité de modifier le code source du programme grâce à sa licence open source, ce qui leur permet d'expérimenter de nouvelles approches et de contribuer à son développement.

Dans SUMO, chaque véhicule possède au minimum un identifiant (nom), une heure de départ et un itinéraire spécifique à travers le réseau. Il est possible de décrire chaque véhicule plus en détails. Les propriétés de départ et d'arrivée, comme la voie à emprunter, la vitesse ou encore la position peuvent être définies. Autrement dit, chaque véhicule suit son propre itinéraire. Chaque véhicule peut se voir attribuer un type qui décrit les propriétés physiques du véhicule et les variables du modèle de mouvement utilisé. Chaque véhicule a la possibilité d'être attribué à l'une des catégories disponibles en termes d'émissions polluantes ou sonores. De nouvelles variables sont utilisées pour déterminer l'apparence du véhicule dans l'interface utilisateur graphique de la simulation (Behrisch, 2011). Les véhicules de la simulation calculent leurs vitesses en prenant en compte la position, la vitesse et l'accélération du véhicule qui les précède. Cette méthode de simulation est appelée « modèle de poursuite » (Mastio, 2017).

La simulation est dite à événements discrets lorsque l'on fait une simulation avec le logiciel SUMO car celui-ci se base sur la modélisation du comportement individuel des véhicules et des piétons. SUMO s'apparente à une simulation à événements discrets car le changement d'état du système est déclenché par des événements spécifiques. Le temps de simulation est discrétisé en « pas de temps ». C'est-à-dire qu'à chaque « pas de temps », le modèle réévalue les divers états et variables du système. Ces événements sont : le passage d'un feu au vert, un freinage brusque, un changement de direction, une collision. Ces événements discrets déclenchent des

changements d'état dans le système de simulation, influençant ainsi le déroulement du trafic. Par exemple, lorsque le feu de signalisation passe au vert, cela déclenche un événement dans la simulation SUMO, modifiant ainsi le comportement des véhicules qui peuvent alors commencer à avancer.

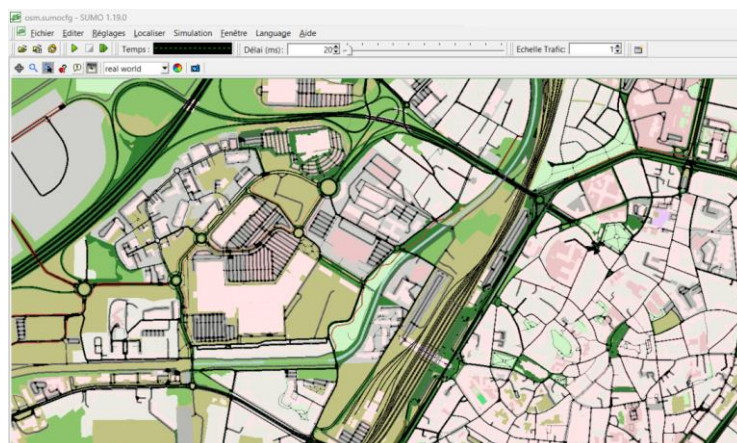
Utilisation de SUMO (mise en place)

Afin d'assurer le bon fonctionnement de SUMO, il est nécessaire d'utiliser les outils qui l'accompagnent : Sumo-gui, OpenStreetMap (OSM), OSMWeb Wizard et Netedit.

Sumo-gui

Sumo-gui est l'interface graphique de SUMO (Figure 8). C'est une application qui permet de visualiser et interagir avec les simulations du trafic de manière graphique. Dans cette application, il est possible de charger des réseaux routiers, visualiser le déroulement de la simulation en temps réel, modifier les paramètres de la simulation et en analyser les résultats. L'application sumo-gui contient des commandes qui permettent d'interagir avec la simulation. On peut retrouver des commandes comme « Play » pour lancer la simulation, « Stop » pour arrêter la simulation ou encore une commande « Time » qui permet de ralentir ou d'accélérer la simulation dans l'application.

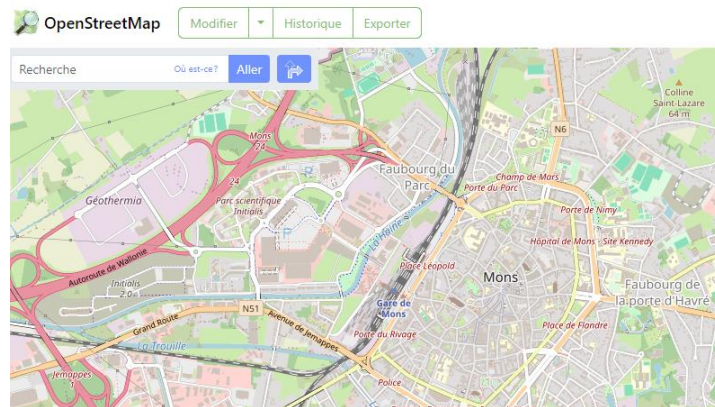
Figure 8 : Interface sumo-gui



OpenstreetMap (OSM)

L’outil OpenstreetMap (OSM) (Figure 9) est quant à lui une base de données cartographiques collaborative et opensource. OSM contient des données géographiques et détaillées sur les routes, les bâtiments, les points d’intérêts et d’autres éléments du monde réel. Les données d’OSM peuvent être utilisées pour générer des réseaux de simulation pour SUMO depuis le site web d’OpenstreetMap ou encore à l’aide d’outils tels que OSMWeb Wizard.

Figure 9 : Interface OpenStreetMap – OSM



OSMWeb Wizard

OSMWeb Wizard (Figure 10) est un outil qui facilite le téléchargement et la conversion des données d’OSM au format SUMO. Il permet de rechercher des régions et réseaux routiers spécifiques et de sélectionner les données qui sont pertinentes pour notre recherche afin de les convertir en fichiers SUMO compatibles. La zone géographique dans laquelle la simulation doit être réalisée est sélectionnable directement dans l’outil OSMWeb Wizard. Une fois la zone de simulation définie, il est possible de générer la demande sur le réseau routier, c’est-à-dire, sélectionner les modes de transport désirés dans la simulation. L’outil va générer une demande aléatoire basée sur une certaine distribution de probabilité, qui est influencée par deux paramètres « Through Traffic Factor » et « Count ». « Through Traffic Factor » définit le nombre de véhicules qui partent et arrivent à la limite de la zone de simulation. Une grande valeur pour ce paramètre correspond à un scénario avec beaucoup de trafic. Le paramètre « Count » définit combien de véhicules sont générés par heure et par kilomètre de voie. Dans l’OSMWeb Wizard, il est également possible de sélectionner le type de routes désirées dans la simulation, par exemple, autoroutes, chemins pédestres, voies navigables, etc.

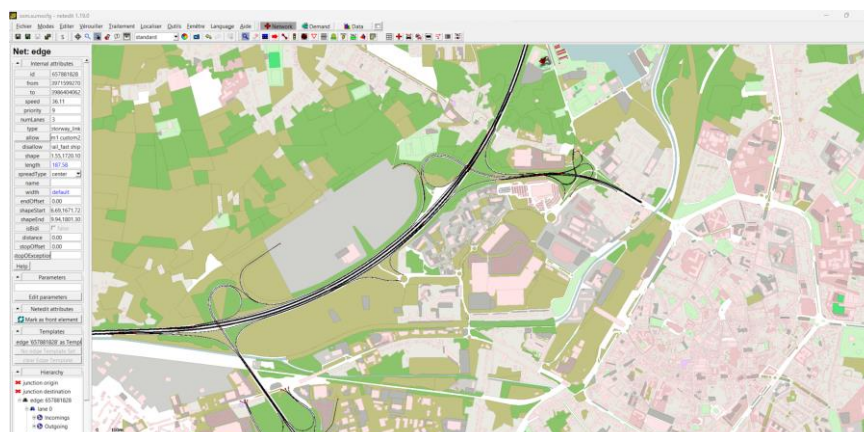
Figure 10 : Interface OSMWeb Wizard



Netedit

Le logiciel "Netedit" (Figure11), partie intégrante de la suite Simulation of Urban MObility (SUMO), est un éditeur graphique de réseaux qui facilite la création, la visualisation et la modification de réseaux routiers pour la simulation. Cet outil permet de modifier les paramètres et les caractéristiques d'une simulation. Netedit permet d'ajouter des attributs comme les configurations de voies et les limites de vitesse, assurant ainsi que les réseaux simulés soient réalistes. Il s'intègre avec d'autres outils de SUMO, permettant l'importation et la modification de fichiers de réseau. Par exemple, les utilisateurs peuvent importer des fichiers de réseau existants depuis OpenStreetMap (OSM), puis les affiner dans Netedit, pour enfin faire tourner la simulation dans l'outil SUMO.

Figure 11 : Interface Netedit



Exercice pratique

Le but de cet exercice pratique va être de simuler, à l'aide de l'outil SUMO présenté précédemment, une partie du réseau routier et d'en faire varier les limitations de vitesse. De cette manière, il me sera possible d'analyser les résultats obtenus à la suite des différentes variations et de comparer ces mêmes résultats avec ceux obtenus dans les études qui ont été présentées dans la partie « théorique » de ce mémoire.

Méthodologie

Comme dit précédemment, le but de l'exercice est d'analyser les résultats d'une variation des limites de vitesse sur un axe routier. La première étape est donc de déterminer l'axe routier sur lequel les analyses vont être effectuées. Lorsque ce choix est fait, une analyse des résultats avec les limitations en vigueur à l'heure actuelle va être réalisée afin de faire « l'état des lieux » sur la situation actuelle de cet axe routier. C'est-à-dire, de récolter les mesures sur le trafic tel qu'il est avec les limitations de vitesses mises en place.

Une fois ces deux premières étapes réalisées, une variation (à la hausse et la baisse) des limitations de vitesse sera appliquée sur l'axe routier simulé. Les variations se feront à hauteur de 10km/h par rapport à la vitesse appliquée dans la réalité.

Enfin, il sera possible d'analyser les résultats obtenus, de les comparer avec les résultats des études existantes à ce sujet et de tirer les conclusions et limites de cet exercice pratique.

Choix de l'axe routier

L'axe routier choisi pour cet exercice est une portion de l'autoroute E42 qui se situe entre Saint-Ghislain et le Roeulx. Cette portion d'autoroute se situe à proximité de la ville de Mons (l'axe routier choisi est en rouge sur la Figure 12).

J'ai décidé de choisir cet axe en particulier car c'est un axe majeur en Belgique. L'E42 commence à Tournai, près de la frontière française, et se dirige vers l'est en passant par Mons, Charleroi, Namur, et Liège, avant de continuer vers l'Allemagne. Elle permet donc de connecter ces grandes villes wallonnes, en servant de lien important pour le transport international entre

la France et l'Allemagne. Être un axe d'une telle importance est également synonyme de trafic élevé, notamment autour des grandes villes qu'elle dessert, ceci est une raison supplémentaire qui rend le travail sur cet axe routier intéressant. Le choix de cet axe routier est également personnel, habitant dans la région de Mons et réalisant mes études à L'UCLouvain Fucam Mons, cette portion de l'E42 est un axe que j'emprunte de manière régulière. Comme cité au début de ce mémoire, les limitations sur les autoroutes belges ont souvent fait débat dans la société. Réaliser cet exercice pratique sur cette autoroute importante en Belgique semble donc être un choix judicieux.

Figure 12 : Zone de simulation de l'exercice pratique



Etude de cas

Maintenant que l'axe routier est déterminé, il faut simuler le trafic routier sur celui-ci et effectuer les variations de limitations de vitesse afin d'obtenir les observations de ces changements.

Approche

Comme évoqué dans la partie « Présentation de SUMO », c'est avec cet outil que la simulation du trafic va être réalisée. Je vais utiliser tous les outils qui sont associés à SUMO afin de mener à bien cet exercice.

J'ai, dans un premier temps, utilisé l'outil OSMWebWizard pour convertir les données de la zone d'étude provenant d'OpenStreetMap au format SUMO. De cette façon, le réseau routier est modélisé dans l'interface Sumo-gui et la simulation peut être lancée avec les paramètres et

les caractéristiques de l'E42. C'est-à-dire une vitesse limitée à 120 km/h (33,33 m/s) sur l'autoroute et une densité de trafic correspondant à la réalité. En effet des données de comptages routiers relatives à l'E42 sont disponibles sur le site du Service Public de Wallonie. Celles-ci nous apprennent qu'entre 2016 et 2018, le nombre de véhicules circulant par jour sur la portion de l'E42 choisie pour cet exercice oscillait entre ± 85000 et ± 87000 véhicules/24h (Annexe 14). Lors la génération du flux de trafic avec OSMWebWizard, les paramètres choisis pour chaque véhicule sont les suivants ; voitures : Through Traffic Factor = 5 et Count = 12, camions : Through Traffic Factor = 5 et Count = 8, bus : Through Traffic Factor = 5 et Count = 4 et moto : Through Traffic Factor = 2 et Count = 4. Sachant que la portion de l'E42 simulée a une longueur d'environ 20 kilomètres (avec 3 bandes de chaque côté) et que la simulation intègre une partie de la R5 entre Mons et Frameries (avec 2 bandes de chaque côté). Le nombre de véhicules/24h de la simulation est calculable comme suit (Annexe 15) :

- E42 : $20 \text{ km} * 6 \text{ bandes} = 120 \text{ km de voies}$
- R5 (additionnel) : $3 \text{ km} * 4 \text{ bandes} = 12 \text{ km de voies}$
- Total : 120 km de voies

Une fois le nombre de kilomètres de voies déterminé, il est possible de calculer le nombre de véhicules sur le réseau grâce au paramètre « Count ».

- Voitures : $132 * 12 = 1584 \text{ voitures/h}$
- Camions : $132 * 8 = 1056 \text{ camion/h}$
- Bus = $132 * 4 = 528 \text{ bus/h}$
- Moto : $132 * 528 \text{ moto/h}$
- Total : $1584 + 1056 + 538 + 528 = 3696 \text{ véhicules/h}$

Ce qui correspond à un trafic pour la simulation de 88704 véhicules par jour. Le trafic routier de la simulation est donc très proche des données de comptages routier pour cet axe entre 2016 et 2018

Une fois la simulation avec les caractéristiques réelles du réseau routier (120 km/h) effectuée, j'ai modifié les paramètres relatifs aux limitations de vitesse grâce à l'outil Nedit. J'ai modifié les limitations de vitesse des segments de l'autoroute E42 à 110 km/h (30,55 m/s) pour évaluer l'impact d'une variation à la baisse des limitations. Ensuite, j'ai procédé de la même manière mais avec une hausse des limitations de vitesse à 130 km/h (36,11 m/s).

Après chaque simulation, SUMO m'a fourni des données analysables pour chacune d'entre elles. J'ai prélevé dans chacun des scénarios un échantillon des 70 mêmes véhicules, à hauteur de 50 voitures et 20 camions. Ce choix semblait pertinent car dans chacune des trois simulations, les véhicules de l'échantillon effectuent les mêmes trajets mais agissent et réagissent de manières différentes en fonction des limitations en vigueur. Ceci donne des observations intéressantes car les agents ne se comportent pas de la même manière dans les trois scénarios (uniquement les itinéraires empruntés restent inchangés).

Lorsque le temps de la simulation est écoulé, SUMO fournit différents fichiers qui représentent les données de la simulation. Les fichiers apportent des informations relatives à la construction de la simulation et aux données des trajets de chaque véhicule présent dans la simulation. Ces fichiers sont de type XML ou Python. Le fichier généré par SUMO qui contient les informations les plus pertinentes se nomme « tripinfo.xml » (Annexe 1). Dans ce fichier j'ai extrait des données relatives aux distances parcourues, aux temps de parcours, à la congestion, aux émissions de CO2 et à la consommation de carburant pour chaque véhicule. Voici les noms des données extraites du fichier « tripinf.xml », que j'ai utilisées pour les analyses, avec une explication pour chacun d'entre elles :

- Id : identifiant unique du véhicule dans la simulation.
- Depart : temps de départ du véhicule, en secondes depuis le début de la simulation.
- Arrival : temps d'arrivée du véhicule, en secondes depuis le début de la simulation.
- Duration : durée totale du trajet du véhicule en secondes.
- RouteLength : longueur totale du trajet du véhicule en mètres.
- timeLoss : perte de temps en secondes par rapport à une situation, sans retard, en raison du ralentissement.
- CO2_abs : quantité de dioxyde de carbone (CO2) émise par le véhicule durant son trajet, en milligrammes.
- Fuel_abs : consommation totale de carburant du véhicule durant son trajet, en milligrammes.

C'est sur ces données que seront basés tous les calculs dans les trois scénarios envisagés dans cet exercice pratique.

Scénarios

Scénario 1 : limitations de vitesse à 120 km/h (paramètres actuels)

Dans les annexes 2 (voitures) et 4 (camions), toutes les données des véhicules relatives à la simulation avec une limitation de vitesse fixée à 120 km/h sont présentées sous forme de tableau. Ensuite, des calculs ont été effectués pour chaque véhicule afin d'analyser différents résultats de la simulation (Annexes 3 et 5). Ces calculs ont permis d'obtenir les observations suivantes : le temps de parcours, la vitesse moyenne, le temps perdu durant le trajet, les émissions de CO₂ du véhicule et la consommation de carburant. À partir de ces résultats, des moyennes ont été calculées pour fournir une vue d'ensemble de la simulation (Tableau 3).

Tableau 3 : Résultats scénario 1

Moyennes voiture	
Vitesse moyenne (km/h)	103,08
Temps perdu (s/km)	1,73
Emissions CO₂ (mg/km)	213373,72
Carburant (mg/km)	68056,32
Temps de parcours (s/km)	35,54
Moyennes camion	
Vitesse moyenne (km/h)	95,73
Temps perdu (s/km)	2,57
Emissions CO₂ (mg/km)	915341,40
Carburant (mg/km)	287933,03
Temps de parcours (s/km)	38,05

Le tableau 4 présente les moyennes globales de la simulation, en tenant compte de la composition de l'échantillon de données, qui comprend 71% de voitures et 29% de camions. Autrement dit, il s'agit des résultats combinés du scénario 1 pour les voitures et les camions.

Tableau 4 : Résultats moyens scénario 1

Moyennes voiture/camion	
Vitesse moyenne (km/h)	100,95
Temps perdu (s/km)	1,97
Emissions CO₂ (mg/km)	416944,35
Carburant (mg/km)	131820,57
Temps de parcours (s/km)	36,27

Ces tableaux (Tableau 3 et 4) serviront de base de comparaison avec les deux autres scénarios. Ces comparaisons permettront de tirer des conclusions et d'estimer les impacts d'une modification de la limitation de vitesse sur l'axe routier choisi (l'E42).

Scénario 2 : limitations de vitesse à 110 km/h

Après modification des limitations à 110 km/h, la simulation du trafic routier a été relancée afin d'obtenir les informations provenant de SUMO. Les données relatives aux véhicules de ce scénario 2 ont été compilées dans des tableaux qui se trouvent dans les annexes 6 (voitures) et 8 (camions). Les mêmes calculs que pour le scénario 1 ont été effectués afin d'obtenir les analyses des annexes 7 et 9.

Le tableau 5 permet d'avoir un aperçu global de la situation avec des limitations à 110 km/h.

Tableau 5 : Résultats scénario 2

Moyennes voiture	
Vitesse moyenne (km/h)	100,92
Temps perdu (s/km)	1,72
Emissions CO2 (mg/km)	203490,77
Carburant (mg/km)	66094,34
Temps de parcours (s/km)	36,01
Moyennes camion	
Vitesse moyenne (km/h)	95,18
Temps perdu (s/km)	2,50
Emissions CO2 (mg/km)	907430,47
Carburant (mg/km)	285444,56
Temps de parcours (s/km)	38,02

Tout comme pour le scénario 1, dans le tableau 6, se trouvent les moyennes globales de la simulation avec des vitesses limitées à 110 km/h.

Tableau 6 : Résultats moyens scénario 2

Moyennes voiture/camion	
Vitesse moyenne (km/h)	99,26
Temps perdu (s/km)	1,94
Emissions CO2 (mg/km)	407633,28
Carburant (mg/km)	129705,91
Temps de parcours (s/km)	36,59

Ce tableau 6 va être comparé aux tableaux des autres simulations par la suite pour mesurer l'impact de variations de vitesse.

Scénario 3 : Limitations de vitesse à 130 km/h

De la même façon que pour les précédents scénarios, les données relatives aux véhicules du scénario 3, avec des limitations de vitesses fixées à 130 km/h se trouvent en annexes 10 et 12. Il en est de même pour les analyses de ce scénario qui se situent en annexes 11 et 13.

Les moyennes des résultats du scénario 3 sont dans les tableaux 7 et 8, ces tableaux suivent la même logique de calculs que les scénarios précédents.

Tableau 7 : Résultats scénario 3

Moyennes voiture	
Vitesse moyenne (km/h)	113,86
Temps perdu (s/km)	1,77
Emissions CO2 (mg/km)	232310,91
Carburant (mg/km)	74096,52
Temps de parcours (s/km)	32,01
Moyennes camion	
Vitesse moyenne (km/h)	103,79
Temps perdu (s/km)	2,92
Emissions CO2 (mg/km)	931567,80
Carburant (mg/km)	293038,11
Temps de parcours (s/km)	34,99

Tableau 8 : Résultats moyens scénario 3

Moyennes voiture/camion	
Vitesse moyenne (km/h)	110,94
Temps perdu (s/km)	2,10
Emissions CO2 (mg/km)	435095,41
Carburant (mg/km)	137589,59
Temps de parcours (s/km)	32,88

Analyses de l'étude

Il est maintenant possible d'analyser et de comparer les résultats des différents scénarios afin d'en tirer des conclusions.

Dans le tableau 9, les résultats des trois scénarios ont été rassemblés afin d'avoir une vision plus claire des analyses.

A l'heure actuelle, avec des limitations de vitesse définies à 120 km/h, la vitesse moyenne des voitures sur l'axe routier de l'étude (E42) est de 103,08 km/h. En réduisant cette limite à 110 km/h, les voitures ne roulent que 2,16 km/h (100,92 km/h) moins vite que dans le scénario 1. En revanche, en augmentant les limitations de 10 km/h par rapport au scénario 1, la vitesse moyenne appliquée par les voitures est 10,78 km/h (113,86 km/h) plus élevée. Les analyses vont dans le même sens pour les camions, malgré le fait que ces différences entre les scénarios soient moins importantes. Ces résultats montrent qu'en diminuant les limitations de vitesse à 110 km/h, les vitesses moyennes diminuent légèrement. Tandis qu'en augmentant les limitations à 130 km/h, l'augmentation des vitesses appliquées est significativement plus grande. Ces vitesses moyennes auront des impacts sur les autres paramètres des scénarios.

Le temps perdu, tel qu'exprimé dans les différents résultats, représente la perte de temps totale du véhicule en raison des ralentissements (congestion). On constate, qu'en réduisant la vitesse, la perte de temps en secondes par kilomètre diminue légèrement, ce qui a comme avantage d'apporter plus de fluidité au trafic routier. Au contraire, avec des limitations plus élevées, la perte de temps est plus importante. Autrement dit, avec des limitations de vitesses inférieures à celles appliquées actuellement, le trafic routier sur la E42 serait plus fluide et à contrario, la fluidité du trafic serait moins bonne avec des limitations de vitesse à 130 km/h.

Diminuer la limitation de vitesse n'a pas de gros impact sur le temps de parcours des véhicules, à raison de 0,47 secondes supplémentaires par kilomètre pour les voitures. La différence entre le scénario 1 et le scénario 3 est plus flagrante, en augmentant les limitations de vitesses à 130 km/h, le temps de parcours diminue de 3,53 secondes par kilomètre pour les voitures. Cela est dû au fait que la vitesse moyenne appliquée par les voitures dans le scénario 3 est de 113,86 km/h.

Les paramètres relatifs aux émissions de CO₂ et du carburant sont fortement liés. En effet, plus un véhicule va consommer de carburant, plus les émissions de CO₂ qu'il va produire seront grandes. Il est possible de constater que dans le scénario 3, les émissions de CO₂ sont doublées

par rapport à la diminution des émissions qui est entraînée par une diminution des limitations de vitesse. En effet, pour les voitures, le scénario 2 entraîne une diminution des émissions de CO₂ de 9882,94 mg/km et le scénario 3 entraîne une augmentation des émissions de CO₂ de 18937,20 mg/km. Soit une augmentation quasiment double entre le scénario 2 et le scénario 3.

Tableau 9 : Comparaison des scénarios

Moyennes voiture	Scénario 2 (110)	Scénario 1 (120)	Scénario 3 (130)
Vitesse moyenne (km/h)	-2,16	103,08	+10,78
Temps perdu (s/km)	-0,013	1,73	+0,04
Emissions CO₂ (mg/km)	-9882,94	213373,72	+18937,20
Carburant (mg/km)	-1961,98	68056,32	+6040,20
Temps de parcours (s/km)	+0,47	35,54	-3,53
Moyennes camion			
Vitesse moyenne (km/h)	-0,54	95,73	+8,06
Temps perdu (s/km)	-0,06	2,57	+0,35
Emissions CO₂ (mg/km)	-7910,94	915341,41	+16226,39
Carburant (mg/km)	-2488,47	287933,0372	+5105,07
Temps de parcours (s/km)	-0,027	38,05088462	-3,05

Moyennes voiture/camion			
Vitesse moyenne (km/h)	-1,69	100,95	+9,99
Temps perdu (s/km)	-0,03	1,97	+0,13
Emissions CO₂ (mg/km)	-9311,06	416944,35	+18151,06
Carburant (mg/km)	-2114,66	131820,57	+5769,02
Temps de parcours (s/km)	+0,33	36,266	-3,39

Conclusion

Le scénario 2, où la vitesse est réduite à 110 km/h sur cette portion de la E42, se révèle avantageux pour l'environnement. Cette diminution de la vitesse entraîne des baisses significatives des émissions de CO₂, qui sont entraînées par une consommation de carburant plus faible. Cependant, un tel ajustement (la réduction de la limitation) a également un impact sur la durée des trajets, provoquant une légère augmentation du temps de parcours. Ce compromis met en lumière l'importance d'équilibrer les gains environnementaux avec les exigences de temps de transport.

D'un autre côté, le scénario 3, où la limitation de vitesse est fixée à 130 km/h, favorise la réduction de temps de parcours, ce qu'il semble attrayant pour l'optimisation du temps de trajet. Cependant, cette diminution du temps de parcours se fait au détriment des coûts écologiques. En effet, le scénario 3 permet de démontrer qu'avec des limitations de vitesse plus élevées, la consommation de carburant et les émissions de CO₂ qui y sont liées augmentent de manière significative.

En définitive, bien que le scénario 3 puisse offrir des avantages en termes de réduction du temps de parcours, il implique des coûts écologiques qui doivent être pris en compte dans toute politique de gestion de la vitesse sur les routes.

Limites

L'étude de cas qui a été menée dans ce travail présente deux limites principales.

La première est que la demande de fréquentation du trafic est générée par l'outil OSMWebWizard. Par conséquent, il est possible que celle-ci ne soit pas tout à fait représentative de la réalité de la fréquentation sur la portion de l'E42 sur laquelle l'étude de cas est basée. Cependant, la demande de trafic qui a été générée reste une base solide car elle représente et simule les comportements et réactions que pourraient avoir les agents sur le réseau routier.

Ensuite, l'étude de cas n'a pas permis de déterminer l'impact que pourraient avoir les variations de limitations de vitesse sur la sécurité routière. Evaluer l'impact sur la sécurité routière n'a pas été faisable car l'outil SUMO est conçu pour éviter les accidents.

Implications managériales

Il est essentiel de souligner plusieurs implications managériales significatives qui émergent de cette recherche. Ces implications renforcent la prise de décision fondée sur les données mais encouragent également une approche adaptative et personnalisée dans la gestion des politiques de circulation.

Premièrement, cette recherche met en avant l'importance, pour les gestionnaires et les décideurs de transports, de s'appuyer sur des simulations avancées pour comprendre les conséquences potentielles de modifications réglementaires avant leur mise en pratique dans la réalité. Cela aide à baser les décisions d'une part sur l'expérience et les pratiques traditionnelles mais aussi sur des preuves concrètes, réduisant de cette manière les risques d'effets qui sont inattendus.

De plus, les résultats obtenus soulignent l'importance d'adopter une gestion de trafic personnalisée. Les impacts des changements de limitation de vitesse peuvent varier selon les spécificités de chaque route ou région, l'environnement joue donc un rôle important dans les prises de décisions. Il est donc crucial d'ajuster les politiques pour répondre efficacement aux conditions locales spécifiques, plutôt que d'uniquement se baser sur une approche uniforme.

La gestion des risques et la capacité de prévision sont également améliorées grâce à l'utilisation de modèles multi-agents. En simulant différents scénarios, comme réalisés dans ce travail, il est possible d'identifier, au préalable, les risques associés à chaque option de politique et de planifier des stratégies pour contrer les effets indésirables comme par exemple, l'augmentation des émissions de CO₂ ou des risques pour la sécurité.

Cette recherche encourage aussi l'engagement actif des parties prenantes dans le processus décisionnel. Les simulations peuvent servir d'outil pour illustrer visuellement aux conducteurs (agents) et aux décideurs comment les modifications de la vitesse ou de tout autre paramètre, affectent divers facteurs tels que la sécurité, l'environnement et le flux de trafic. Cela pourrait faciliter la compréhension des enjeux et soutenir une prise de décision collaborative.

Enfin, ce travail montre l'importance de la formation et du développement continu pour les professionnels du secteur des transports. Comprendre les fondements des modèles multi-agents et rester informé des avancées technologiques sont indispensables pour maintenir l'efficacité des stratégies de gestion du trafic.

Conclusion générale

Ce mémoire a examiné l'application des modèles multi-agents pour simuler les effets d'une modification des limitations de vitesse sur la sécurité routière, l'environnement et le flux de trafic. À travers une démarche méthodique, des scénarios de simulation sur le logiciel SUMO ont été appliqués et développés, intégrant des données issues de OpenStreetMap afin de refléter au mieux la réalité d'un axe routier déterminé pour l'étude.

Les résultats des scénarios réalisés dans le cas pratique de ce travail ont mené à plusieurs conclusions. La réduction de la vitesse à 110 km/h sur la portion d'autoroute déterminée dans l'étude (l'E42) réduit les émissions de CO₂, grâce à une consommation de carburant moindre, mais allonge légèrement les temps de trajet. Au contraire, une augmentation de la vitesse limite à 130 km/h (sur le même axe routier), diminue le temps de parcours, mais a un coût écologique élevé, avec une augmentation significative de la consommation de carburant et des émissions de CO₂. Ces conclusions soulignent la nécessité d'équilibrer les bénéfices environnementaux avec les exigences de temps de transport lors de la formulation des politiques de gestion de vitesse. Cependant, cette étude présente certaines limites comme la difficulté de simuler les comportements humains des conducteurs et le fait que l'outil SUMO, utilisé pour la simulation, soit conçu pour éviter les accidents.

Grâce aux études analysées dans la partie théorique de ce travail, il est raisonnable d'apporter quelques nuances quant aux conclusions du cas pratique réalisé. Il paraît donc judicieux d'ajouter aux conclusions de ce mémoire que l'adoption d'une limitation de vitesse doit également tenir compte des contraintes économiques et institutionnelles. La régulation et son application doivent être alignées avec leur environnement. En absence de cette cohérence, diminuer la limite de vitesse pourrait s'avérer inefficace et ne pas avoir l'effet escompté, par exemple pour contribuer à la baisse du taux de mortalité. Par ailleurs, d'autres études indiquent que la réduction de la vitesse sur une route peut effectivement diminuer le nombre de décès. Il est essentiel de considérer divers facteurs lors de l'implémentation de nouvelles limites de vitesse. Ces facteurs incluent des aspects environnementaux, tels que les caractéristiques du réseau routier et l'influence des éléments extérieurs, ainsi que les perceptions et comportements des conducteurs qui peuvent ne pas adhérer aux nouvelles règles.

Bibliographie

Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J., & Krajzewicz, D. (2011). *SUMO – Simulation of Urban MObility: An overview*. Institute of Transportation Systems, German Aerospace Center.

Carnis, L. (2006). *Approche économique et institutionnelles des limitations de vitesse : les enseignements du Montana*. In M. A. Dekkers (Ed.), *Séminaire de vitesse, Apports récents de la recherche en matière de vitesse* (pp. 141-157).

Carnis, L., & Garcia, C. (2023). *Does the 80 km/h speed limit save lives in France?* Journal of Safety Research, 88, 326-335.

Cloutier, M.-S., Lachapelle, U., & Saunier, N. (2019). *Mesurer l'impact sur la sécurité routière d'une modification de limite de vitesse sur le réseau routier du Québec* (Rapport technique n° Projet R794.1). Institut National de la Recherche Scientifique, Université du Québec à Montréal, Polytechnique Montréal.

Costeseque, G. (2013). *Modélisation et simulation dans le contexte du trafic routier*. In F. Varenne & M. Silberstein (Eds.), *Modéliser et simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*. Editions Matériologiques.

Elvik, R. (2009). *The Power Model of the relationship between speed and road safety: update and new analyses*. (1034/2009). The Institute of Transport Economics (TOI). <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=13206>

Elvik, R., Vadeby, A., Hels, T., & van Schagen, I. (2019). *Updated estimates of the relationship between speed and road safety at the aggregate and individual levels*. *Accident Analysis & Prevention*, 123, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.11.014>

Emery, J. (2016, 17 novembre). *La ville sous électrodes : de la mesure à l'évaluation de la pollution atmosphérique automobile vers une simulation multi-agents du trafic routier en milieu urbain*.

European Commission. (2021). Road safety thematic report - Speeding. European Road Safety Observatory. Brussels, European Commission, Directorate General for Transport. https://road-safety.transport.ec.europa.eu/system/files/2021-07/road_safety_thematic_report_speeding.pdf

Ferber, J. (1995). *Les Systèmes Multi-Agents : Vers une intelligence collective*. InterEditions. ISBN: 2729606653.

German Aerospace Center (DLR) (2024), *SUMO User Documentation*, consulté le 26/05/2024.
<https://sumo.dlr.de/docs/index.html>

Horni, A., Nagel, K., & Axhausen, K. W. (2016). *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. *Transportation Research B: Methodological*, 95, 294-312.
<https://doi.org/10.5334/baw>

Ksontini, F. (2013). *Modèle d'agent fondé sur les affordances : application à la simulation de trafic routier*. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis. (NNT : 2013VALE0027).

Le Soir. (2023, 22 novembre). *Faut-il augmenter à 150km/h la vitesse sur les autoroutes belges ? L'institut Vias répond*. <https://www.lesoir.be/531987/article/2023-08-19/faut-il-augmenter-150kmh-la-vitesse-sur-les-autoroutes-belges-linstitut-vias>

Mastio, M. (2017). *Modèles de distribution pour la simulation de trafic multi-agent*. Université Paris-Est. (NNT : 2017PESC1147).

Rogers, S. D., Kadar, E. E., & Costall, A. (2005). *Gaze patterns in the visual control of straight-road driving and braking as a function of speed and expertise*. *Ecological Psychology*, 17(1), 19–38. https://doi.org/10.1207/s15326969eco1701_2

RTBF. (2022, 16 juin). *Rapport des experts sur le pouvoir d'achat : limiter notre vitesse à 100 km/h ? Plus sûr, plus écologique et plus économique. On l'avait testé !*
<https://www.rtb.be/article/rapport-des-experts-sur-le-pouvoir-dachat-limiter-notre-vitesse-a-100-kmh-plus-sur-plus-ecologique-et-plus-economique-on-lavait-teste-11013558>

Service Public de Wallonie (n.d.). Carte du trafic en temps réel. Consulté le 26/05/2024.
<http://trafiroutes.wallonie.be/trafiroutes/pages/mentionsLegales/#>

SWOV. (2021). *Snelheid en snelheidsmanagement (SWOV-Factsheet)*. Leidschendam: SWOV.
<https://swov.nl/nl/factsheet/snelheid-en-snelheidsmanagement>

Van den Berghe, W., & Pelssers, B. (2020). *Dossier thématique n° 9 – Vitesse et vitesse excessive (2020-T-01-FR)*. Bruxelles, Belgique : Institut Vias – Centre de connaissance Sécurité routière. <https://www.vias.be/publications/Themadossier>

VIAS Institute. (2021). *Mesure nationale de comportement en matière de vitesse 2021 (Rapport n° 2023-R-10-FR)*.

Wardenier, N., Vervoort, M., Silverans, P., Boets, S., & Ben Messaoud, Y. (2023). *Mesure nationale de comportement en matière de vitesse 2021 (Rapport n° 2023-R-10-FR)*.

Weyns, D., Parunak, H. V. D., Michel, F., Holvoet, T., & Ferber, J. (2005). *Environments for multiagent systems: State-of-the-art and research challenges*. In Lecture Notes in Computer Science (Vol. 3374, pp. 2–52). Springer.

Ziemke, D., Charlton, B., Hörl, S., & Nagel, K. (2020). *An efficient approach to create agent-based transport simulation scenarios based on ubiquitous Big Data a new, aspatial activity-scheduling model*. Transportation Research Procedia. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.01.073

Ziemke, D., Kaddoura, I., & Nagel, K. (2019). *The MATSim Open Berlin Scenario: A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data*. Transportation Research Procedia, 27, 1013-1021.
<https://www.semanticscholar.org/paper/The-MATSim-Open-Berlin-Scenario%3A-A-multimodal-based-Ziemke-Kaddoura/af292df83d0bb3ceeded5cfb79766823ac6c4d0b>

Annexes

Annexe 1 (Exemple données dans fichier « tripinfo.xml ») :

```
</tripinfo>
<tripinfo id="veh3" depart="9.00" departLane="31961283_0" departPos="5.10" departSpeed="
25.65" departDelay="0.86" arrival="140.00" arrivallane="50938749_0" arrivalPos="25.28"
arrivalSpeed="14.68" duration="131.00" routeLength="3942.59" waitingTime="0.00"
waitingCount="0" stopTime="0.00" timeLoss="11.10" rerouteNo="1" devices="tripinfo_veh3
routing_veh3 emissions_veh3 fcd_veh3" vType="veh_passenger" speedFactor="1.15" vaporized="
">
  <emissions CO_abs="20600.262268" CO2_abs="1005650.070460" HC_abs="119.221537" PMx_abs=
"25.460226" NOx_abs="396.190422" fuel_abs="320755.540114" electricity_abs="0"/>
</tripinfo>
<tripinfo id="motorcycle8" depart="66.00" departLane="661849368_0" departPos="2.30"
departSpeed="23.27" departDelay="0.91" arrival="152.00" arrivallane="394138958_0"
arrivalPos="390.35" arrivalSpeed="31.01" duration="86.00" routeLength="2362.39"
waitingTime="0.00" waitingCount="0" stopTime="0.00" timeLoss="11.50" rerouteNo="1" devices
="tripinfo_motorcycle8 routing_motorcycle8 emissions_motorcycle8 fcd_motorcycle8" vType="
motorcycle_motorcycle" speedFactor="1.05" vaporized="">
  <emissions CO_abs="29154.568319" CO2_abs="751630.665037" HC_abs="133.741598" PMx_abs="
46.916962" NOx_abs="139.054339" fuel_abs="239759.098284" electricity_abs="0"/>
</tripinfo>
<tripinfo id="veh31" depart="85.00" departLane="73900322_1" departPos="5.10" departSpeed="
35.01" departDelay="0.92" arrival="158.00" arrivallane="394138958_0" arrivalPos="390.35"
arrivalSpeed="28.83" duration="73.00" routeLength="2394.39" waitingTime="0.00"
waitingCount="0" stopTime="0.00" timeLoss="1.58" rerouteNo="1" devices="tripinfo_veh31
routing_veh31 emissions_veh31 fcd_veh31" vType="veh_passenger" speedFactor="0.97"
vaporized="">
  <emissions CO_abs="9620.751615" CO2_abs="503412.262806" HC_abs="56.932171" PMx_abs="
12.624440" NOx_abs="188.665072" fuel_abs="160565.539781" electricity_abs="0"/>
</tripinfo>
```

Annexe 2 (Echantillon des données des voitures de la simulation avec des limitations de vitesse fixées à 120 km/h) :

ID	T départ	T d'arrivée	Durée	Distance	Temps perdu	Emission CO2	Carburant
veh1	3	152	149	4054,82	6,46	837999,75	267282,51
veh3	9	156	147	3942,55	10,7	884475,64	282105,97
veh31	85	186	101	2394,39	3,23	441767,29	140903,53
veh12	33	199	166	3953,68	11,75	844016,05	269200,73
veh14	38	226	188	6096,48	12,23	1458615,92	465231,45
veh27	74	231	157	3988,48	4,82	748437,17	238716,28
veh13	36	258	222	6075,45	11,33	1362409,94	434544,78
veh6	17	260	243	6224,96	22,14	1504627,23	479904,06
veh2	6	282	276	10041,53	11,81	2502818,31	798286,37
veh26	71	285	214	6627,3	9,81	1558905,9	497218,86
veh17	47	295	248	7529,82	12,6	1579963,1	503936,46
veh5	14	306	292	9069,53	37,36	2339144,75	746078,6
veh68	185	330	145	3794,33	4,03	686351,01	218914,2
veh7	19	335	316	9086,31	22,56	2151373,79	686186,87
veh15	41	340	299	9121,11	17,28	2012363,78	641850,93
veh39	106	345	239	6636,76	12,41	1472675,19	469714,26
veh4	11	378	367	9524,86	19,5	1950089,38	621987,85
veh11	30	366	336	9121,11	11,66	1811492,14	577781,12
veh119	323	405	82	2714,95	5,56	634972,61	202527,14
veh124	337	409	72	2714,95	1,57	623517,69	198874,34
veh78	212	415	203	6227,5	11,07	1457447,27	464858,05
veh43	117	399	282	7729,61	9,63	1495486,28	476991,2
veh54	147	418	271	7592,54	11,27	1515416,89	483347,46
veh50	136	436	300	8268,34	8,35	1649490,43	526111,74
veh118	321	437	116	3429,08	3,23	684430,09	218301,88
veh0	0	427	427	11855,4	23,04	2615812,3	834322,03
veh121	329	481	152	4054,85	6,43	793738,32	253165,9
veh32	87	444	357	12613,97	6,59	2804745,32	894586,92
veh8	22	518	496	11474,31	25,58	2252933,96	718580,44
veh98	266	500	234	6227,5	11,29	1290920,02	411743,05
veh86	234	514	280	7592,54	8,2	1465095,97	467297,29
veh131	356	517	161	5932,55	5,72	1474200,21	470202,79
veh20	55	496	441	12613,97	9,24	2404681,31	766982,33
veh84	228	567	339	7676,12	26,4	1490918,4	475532,43
veh105	285	574	289	7786,7	8,03	1510924,11	481914,29
veh147	399	565	166	5932,55	4,58	1445148,73	460936,82
veh133	361	593	232	6227,5	11,98	1283536,97	409388,55
veh110	299	599	300	9121,13	9,29	1954793,68	623489
veh28	353	613	260	6208,2	16,45	1339885,55	427359,65
veh157	426	600	174	6096,48	12,02	1550126,04	494419,78
veh199	540	622	82	2714,95	1,91	566583,25	180714,56
veh182	494	665	171	3794,35	5,3	627526,67	200151,62
veh171	464	645	181	6096	11,89	1482004,41	472692,23
veh166	451	686	235	6192,58	7,84	1213363,56	387006,38
veh138	375	695	320	8569,28	16,44	1848775,01	589672,13
veh196	532	704	172	3988,51	5,11	677359,62	216046,28
veh151	410	678	268	6996,3	25,12	1620878,41	516983,39
veh208	565	712	147	3988,51	3,67	745451,57	237764,87
veh161	437	719	282	7592,54	8,6	1461417,87	466124,26
veh169	459	752	293	9121,13	29,09	2141257,8	682961,99

Annexe 3 (Analyses des données des voitures de la simulation avec des limitations de vitesse fixées à 120 km/h) :

Temps de parcours (s/km)	Vitesse moyenne (km/h)	Temps perdu (s/km)	Emissions CO2 (mg/km)	Carburant (mg/km)
36,74639072	97,96880537	1,593165665	206667,5586	65917,23184
37,28551318	96,5522449	2,713979531	224341,0077	71554,18955
42,1819336	85,34459406	1,348986589	184500,9752	58847,35987
41,9862002	85,74245783	2,971914773	213476,0653	68088,64906
30,83746687	116,7411064	2,006075637	239255,4261	76311,4863
39,3633665	91,45559236	1,208480424	187649,7237	59851,44215
36,54050317	98,52081081	1,864882437	224248,3997	71524,70681
39,03639541	92,22162963	3,55664936	241708,7387	77093,51707
27,48585126	130,9764783	1,176115592	249246,7094	79498,47981
32,29067644	111,4872897	1,480240822	235224,888	75025,85668
32,93571427	109,3038387	1,673346773	209827,4726	66925,43248
32,19571466	111,8161233	4,119287328	257912,4552	82262,10178
38,21491541	94,20405517	1,062111097	180888,5917	57695,08714
34,77759398	103,5149241	2,482856077	236770,8993	75518,76064
32,78109791	109,8193846	1,894506261	220627,0706	70369,8267
36,0115478	99,96793305	1,869888319	221896,7071	70774,63401
38,53075006	93,43186921	2,047274186	204736,8024	65301,52149
36,83762174	97,72617857	1,278353183	198604,3519	63345,48317
30,2031345	119,1929268	2,047919851	233880,0383	74597,00547
26,51982541	135,7475	0,578279526	229660,8372	73251,56633
32,59735046	110,4384236	1,777599358	234034,0859	74646,01365
36,48308259	98,67587234	1,245858459	193474,9981	61709,6076
35,69293017	100,86031	1,484351745	199592,8754	63660,83814
36,2829782	99,22008	1,009876227	199494,7511	63629,66932
33,82831547	106,4197241	0,941943612	199595,8362	63661,93848
36,01734231	99,95185012	1,943418189	220643,1078	70374,85281
37,48597359	96,03592105	1,58575533	195750,3533	62435,33053
28,3019541	127,1996975	0,522436632	222352,3062	70920,3304
43,22700014	83,28128226	2,229327951	196345,9206	62625,1548
37,57527098	95,80769231	1,812926536	207293,4597	66116,90887
36,87830423	97,61837143	1,080007481	192965,1961	61546,89867
27,13841434	132,6532919	0,964172236	248493,5163	79258,12509
34,96123742	102,9711837	0,732521165	190636,3587	60804,19804
44,16293648	81,51631858	3,439237531	194228,1257	61949,5826
37,11456715	96,99695502	1,031245585	194039,0807	61889,41272
27,98122224	128,6577108	0,772012035	243596,5529	77696,23855
37,25411481	96,63362069	1,923725411	206107,9037	65738,82778
32,89066157	109,45356	1,018514153	214314,8579	68356,55231
41,88009407	85,95969231	2,649721336	215825,1264	68837,93209
28,54105976	126,134069	1,97162953	254265,7468	81099,22119
30,2031345	119,1929268	0,703512035	208690,1232	66562,75806
45,06700752	79,88105263	1,396813684	165384,498	52749,90973
29,69160105	121,2464088	1,950459318	243110,9596	77541,37631
37,94864176	94,86505532	1,266031283	195938,2939	62495,17649
37,3426939	96,4044	1,918480899	215744,4978	68812,33079
43,12387333	83,48044186	1,28118019	169827,7352	54167,16518
38,30596172	93,98014925	3,590469248	231676,5162	73893,82817
36,85586848	97,67779592	0,920143111	186899,7621	59612,45427
37,14172069	96,92604255	1,132690773	192480,7601	61392,40096
32,1232128	112,0684915	3,189297817	234757,9521	74876,9056

Annexe 4 (Echantillon des données des camions de la simulation avec des limitations de vitesse fixées à 120 km/h) :

ID camion	T départ	T d'arrivée	Durée	Distance	Temps perdu	Emission CO2	Carburant
truck14	57	214	157	3992,06	18,2	3716490,24	1169079
truck15	62	232	170	3951,61	12,34	4291667,81	1350014,8
truck18	75	241	166	3992,06	9,99	3863896,97	1215450
truck2	9	236	227	6640,07	10,58	6230783,96	1959977,2
truck3	13	242	229	6733,7	4,84	5575580,84	1753862,5
truck29	118	278	160	3986,41	14,11	3099916,31	975119,1
truck9	37	296	259	6222,87	23,3	6955314,65	2187906,1
truck4	17	339	322	10039,45	13,12	8361106,8	2630078
truck10	41	356	315	9084,23	29,55	9041564,7	2844158,7
truck33	135	359	224	6225,4	13,81	6003759,6	1888565
truck67	273	425	152	3792,25	7,32	2862848,91	900536,59
truck82	334	494	160	4052,75	6,91	3330684,86	1047700,3
truck99	403	511	108	2632,98	23,15	3282194,45	1032474,9
truck19	78	493	415	11853,3	25,86	11295229,45	3553076,5
truck80	326	503	177	5930,45	5,09	5057978,23	1591051,1
truck54	220	568	348	8567,18	10,47	7468841,28	2349411,7
truck52	213	633	420	8934,6	22,77	8572924,37	2696725,4
truck84	342	613	271	7590,44	11,98	6358003,21	1999990,2
truck127	517	677	160	3992,06	11,73	3193038,17	1004407,5
truck101	411	688	277	7790,25	8,62	5996640,75	1886301

Annexe 5 (Analyses des données des camions de la simulation avec des limitations de vitesse fixées à 120 km/h) :

Vitesse moyenne (km/h)	Temps perdu (s/km)	Emissions CO2 (mg/km)	Carburant (mg/km)	Temps de parcours (s/km)
91,53768153	4,559049714	930970,5365	292851,0694	39,32806621
83,68115294	3,122777804	1086055,509	341636,6367	43,02043977
86,57479518	2,502467398	967895,5151	304466,8742	41,58254134
105,3050749	1,593356697	938361,186	295174,1804	34,18638659
105,8572926	0,71877274	828011,4707	260460,4408	34,00804907
89,694225	3,539525538	777621,045	244610,8403	40,13636329
86,49549035	3,744253054	1117702,065	351591,1565	41,62066699
112,2422981	1,306844498	832825,1846	261974,3064	32,07347016
103,8197714	3,252889898	995303,3664	313087,478	34,67547607
100,0510714	2,218331352	964397,4042	303364,4376	35,98162367
89,81644737	1,930252489	754920,9335	237467,6221	40,08174567
91,186875	1,705015113	821833,2885	258515,8966	39,47936586
87,766	8,792318969	1246570,217	392131,6721	41,01816193
102,8238072	2,181670927	952918,5501	299754,2018	35,01134705
120,619322	0,858282255	852882,7037	268285,0458	29,84596447
88,626	1,222105757	871796,9367	274233,9615	40,62013405
76,58228571	2,54851924	959519,6618	301829,4462	47,00826002
100,8324133	1,578301126	837633,0239	263488,0415	35,70280511
89,82135	2,93833259	799847,2393	251601,3036	40,07955792
101,2451264	1,106511344	769762,299	242136,133	35,5572671

Annexe 6 (Echantillon des données des voitures de la simulation avec des limitations de vitesse fixées à 110 km/h) :

ID voiture	T départ	T d'arrivée	Durée (s)	Distance (m)	Temps perdu (s)	Emission CO2 (mg)	Carburant (mg)
veh1	3	146	143	4054,85	5,99	858296,16	273756,24
veh3	9	149	140	3942,59	9,5	895252,65	285543,49
veh31	85	173	88	2394,39	6,27	501392,45	159920,43
veh12	33	190	157	3953,71	10,1	868984,79	277164,71
veh27	74	226	152	3988,51	6,55	766049,72	244334,01
veh14	38	249	211	6096,48	11,96	1357084,56	432847,15
veh6	17	257	240	6224,97	21,05	1430657,12	456311,32
veh13	36	272	236	6075,45	11,84	1284790,9	409787,54
veh2	6	300	294	10041,55	10,05	2255003,74	719243,7
veh26	71	300	229	6627,3	9,6	1455629,86	464277,38
veh17	47	304	257	7529,8	6,12	1482916,42	472982,6
veh5	14	310	296	9069,56	35,61	472982,63	690624,8
veh68	185	323	138	3794,35	3,17	685700,62	218706,95
veh7	19	342	323	9086,33	22,27	2007902,99	640426,25
veh15	41	346	305	9121,11	15,73	1873179,61	597457,51
veh39	106	363	257	6636,76	11,36	1360215,16	433844,32
veh4	11	366	355	9524,86	15,11	1911108,24	609554,65
veh11	30	374	344	9121,13	10,94	1738855,825	554613,17
veh119	323	411	88	2714,95	6	580286,13	185084,25
veh124	337	414	77	2714,95	1,62	596257,94	190179,8
veh78	212	415	203	6227,5	11	1426826,08	455090,96
veh43	117	416	299	7729,61	9,65	1459067,68	465374,68
veh54	147	419	272	7592,54	10,46	1546822,73	493363,23
veh50	136	432	296	8268,34	10,58	1665064,54	531078,3
veh118	321	445	124	3429,08	3,38	633872,67	202176,23
veh0	0	450	450	11855,4	23	2494169,7	795522,63
veh121	329	475	146	4054,85	6,59	823822,67	262761,2
veh32	87	476	389	12613,97	7,42	2619288,79	835433,02
veh8	22	495	473	11474,31	22,26	2312833,39	737684,94
veh98	266	501	235	6227,5	12,18	1267224,93	404185,13
veh86	234	519	285	7592,54	11,15	1494974,12	476826,57
veh131	356	529	173	5932,55	4,91	1373686,28	438143,04
veh20	55	538	483	12613,97	11,24	2253991,2	718917,95
veh84	228	543	315	7676,12	28,88	1607192,69	512618,04
veh105	285	577	292	7786,7	8,57	1527173,09	487096,38
veh147	399	578	179	5932,55	5,21	1332648,37	425053,74
veh133	361	593	232	6227,5	11,95	1289068,9	411152,27
veh110	299	608	309	9121,13	9,43	1840802,8	587130,52
veh28	353	610	257	6208,2	14,78	1281221,53	408648,93
veh157	426	621	195	6096,48	11,38	1444259,69	460652,38
veh199	540	628	88	2714,95	1,98	537268,52	171364,08
veh182	494	657	163	3794,35	4,68	644844,69	205675,55
veh171	464	668	204	6096	11,78	1388742,4	442944,58
veh166	451	677	226	6192,58	6,53	1215459,51	387674,7
veh138	375	697	322	8569,28	12,43	1696708,97	541170,67
veh196	532	698	166	3988,51	5,49	729215,87	232585,39
veh151	410	702	292	6996,3	35,24	1514141,62	482938,71
veh208	565	706	141	3988,51	3,39	771427,4	246049,67
veh161	437	721	284	7592,54	7,89	1455207,54	464143,2
veh169	459	756	297	9121,13	25,1	2033690,77	648652,57

Annexe 7 (Analyses des données des voitures de la simulation avec des limitations de vitesse fixées à 110 km/h) :

Temps de parcours (s/km)	Vitesse moyenne (km/h)	Temps perdu (s/km)	Emissions CO2 (mg/km)	Carburant (mg/km)
35,26640936	102,0801399	1,477243301	211671,4946	67513,28409
35,50965228	101,3808857	2,409583548	227072,2165	72425,35744
36,75257581	97,95231818	2,618621027	209403,0003	66789,63327
39,70953864	90,65831847	2,554562677	219789,714	70102,43796
38,10946945	94,46471053	1,642217269	192064,1342	61259,47033
34,61013568	104,0157725	1,961787786	222601,3306	70999,51939
38,55440267	93,37455	3,381542401	229825,5445	73303,37656
38,84485923	92,67635593	1,948826836	211472,5494	67449,74282
29,27834846	122,9577551	1,000841504	224567,2969	71626,76081
34,55404162	104,1846288	1,44855371	219641,4618	70055,28345
34,13105262	105,4757977	0,812770592	196939,6823	62814,76268
32,63664389	110,3054595	3,926320571	52150,55967	76147,55291
36,36986572	98,98304348	0,835452713	180716,2281	57640,16235
35,54790548	101,2717895	2,450934536	220980,6368	70482,38948
33,43891259	107,6590033	1,724570803	205367,5057	65502,71952
38,72371458	92,96628794	1,71167859	204951,6873	65369,89736
37,27088902	96,59012958	1,586375023	200644,2341	63996,17947
37,71462527	95,45368605	1,199412792	190640,3949	60805,3136
32,41311995	111,0661364	2,209985451	213737,3174	68172,24995
28,36147995	126,9327273	0,596696072	219620,2287	70049,09851
32,59735046	110,4384236	1,766358892	229116,994	73077,63308
38,68241735	93,06553846	1,248445911	188763,4279	60206,74782
35,8246384	100,4895	1,377668079	203729,283	64979,99747
35,79920516	100,5608919	1,279579698	201378,3347	64230,34128
36,16130274	99,55393548	0,985687123	184852,109	58959,32145
37,95738651	94,8432	1,940044199	210382,5852	67102,13321
36,0062641	99,98260274	1,62521425	203169,7029	64801,7066
30,83882394	116,7359692	0,588236693	207649,8351	66230,77588
41,22252231	87,33090063	1,939985934	201566,2284	64290,13509
37,73584906	95,4	1,955841028	203488,5476	64903,27258
37,53684538	95,90576842	1,468546758	196900,3943	62801,98326
29,1611533	123,4519075	0,827637357	231550,7295	73854,08298
38,29087908	94,0171677	0,89107553	178690,0714	56993,78943
41,03635691	87,72708571	3,762317421	209375,6598	66780,87888
37,49983947	96,00041096	1,100594604	196125,8415	62554,918
30,17252278	119,3138547	0,878205831	224633,3145	71647,7299
37,25411481	96,63362069	1,918908069	206996,2104	66022,04255
33,87738142	106,2655922	1,033863129	201817,4064	64370,37078
41,39686221	86,96311284	2,380722271	206375,6854	65824,06011
31,98567042	112,5504	1,86665092	236900,5869	75560,38567
32,41311995	111,0661364	0,729295199	197892,6021	63118,68727
42,95860951	83,80159509	1,233412838	169948,6579	54205,74011
33,46456693	107,5764706	1,932414698	227812,0735	72661,51247
36,49528952	98,64286726	1,05448779	196276,7554	62603,09919
37,57608574	95,80561491	1,450530266	197999,0116	63152,40837
41,61955216	86,49780723	1,376453864	182829,1442	58313,85405
41,73634635	86,25575342	5,036948101	216420,3393	69027,73037
35,35154732	101,8342979	0,849941457	193412,4272	61689,62094
37,40513715	96,24346479	1,03917793	191662,8085	61131,47906
32,56175496	110,5591515	2,751852018	222964,7829	71115,37386

Annexe 8 (Echantillon des données des camions de la simulation avec des limitations de vitesse fixées à 110 km/h) :

ID camion	T départ	T d'arrivée	Durée	Distance	Temps perdu	Emission CO2	Carburant
truck14	57	205	148	3992,06	14,22	3512327,27	1104857,55
truck15	62	223	161	3951,61	10,47	4042651,9	1271677,41
truck18	75	237	162	3992,06	12,3	3818004,72	1201011,9
truck2	9	252	243	6640,07	9,89	6174199,95	1942174,31
truck3	13	254	241	6733,7	4,25	5470089,01	1720678,11
truck29	118	273	155	3986,41	14,53	3348734,29	1053387,15
truck9	37	292	255	6222,87	20,96	6617409,37	2081611,88
truck4	17	360	343	10039,45	10,18	7869314,56	2475368,41
truck10	41	362	321	9084,23	28,8	8768255,16	2758181,02
truck33	135	370	235	6225,4	24,66	6487704,75	2040812,48
truck67	273	418	145	3792,25	6,01	3087179,29	971112,34
truck82	334	488	154	4052,75	6,99	3351449,59	1054235,82
truck99	403	514	111	2632,98	21,07	3037770,23	955584,36
truck19	78	515	437	11853,3	25,5	11134215,12	3502420,75
truck80	326	517	191	5930,45	5,51	5151140,99	1620354,73
truck54	220	576	356	8567,18	11,77	7274221,51	2288185,29
truck52	213	598	385	8934,6	19,52	8360861,26	2630021,72
truck84	342	609	267	7590,44	5,78	6094757,84	1917166,53
truck127	517	669	152	3992,06	9,73	3176999,67	999364,97
truck101	411	701	290	7790,25	18,58	6747784,96	2122606,27

Annexe 9 (Analyses des données des camions de la simulation avec des limitations de vitesse fixées à 110 km/h) :

Vitesse moyenne (km/h)	Temps perdu (s/km)	Emissions CO2 (mg/km)	Carburant (mg/km)	Temps de parcours (s/km)
97,10416216	3,56207071	879828,2766	276763,7636	37,07359108
88,35898137	2,649552967	1023039,192	321812,479	40,74288708
88,71244444	3,081116015	956399,6333	300850,1626	40,5805524
98,37140741	1,489442129	929839,5875	292493,0475	36,59599974
100,58639	0,631153749	812345,2203	255532,3388	35,79013024
92,5875871	3,644883492	840037,6002	264244,5584	38,88210194
87,85228235	3,368220773	1063401,512	334509,9416	40,97787677
105,3703207	1,013999771	783839,2103	246564,1454	34,16521821
101,879215	3,170329241	965217,2127	303622,984	35,33596133
95,36782979	3,961191249	1042134,602	327820,2975	37,7485784
94,15241379	1,584811128	814075,889	256078,1436	38,2358758
94,73961039	1,724754796	826956,9033	260128,5103	37,99888964
85,39394595	8,002339554	1153738,437	362928,8335	42,15755532
97,64732265	2,151299638	939334,6258	295480,6467	36,86737027
111,7781152	0,929103188	868591,9264	273226,2695	32,20666223
86,63440449	1,373847637	849080,0368	267087,3368	41,55393023
83,54431169	2,184764847	935784,6193	294363,6783	43,09090502
102,3430112	0,761484183	802951,85	252576,4686	35,17582643
94,54878947	2,437338116	795829,6393	250338,1638	38,07558003
96,70655172	2,385032573	866183,3651	272469,596	37,2260197

Annexe 10 (Echantillon des données des voitures de la simulation avec des limitations de vitesse fixées à 130 km/h) :

ID	T départ	T d'arrivée	Durée	Distance	Temps perdu	Emission CO2	Carburant
veh1	3	133	130	4054,82	6,44	934525,09	298070,26
veh3	9	140	131	3942,55	11,1	1005650,07	320755,54
veh31	85	158	73	2394,39	1,58	503412,26	160565,53
veh12	33	179	146	3953,68	10,83	937008,31	298861,83
veh14	38	226	188	6096,48	12,46	1523151,03	485815,88
veh27	74	209	135	3988,48	3,23	809153,15	258082,94
veh13	36	247	211	6075,45	11,59	1469252,76	468622,89
veh6	17	232	215	6224,96	21,26	1643126,85	524079,69
veh2	6	258	252	10041,53	9,21	2575743,45	821548,94
veh26	71	271	200	6627,3	9,27	1673448,88	533752,65
veh17	47	275	228	7529,82	5,07	1661274,17	529871,83
veh5	14	272	258	9069,53	33,39	2542310,58	810880,29
veh68	185	309	124	3794,33	3,02	780603,34	248977,4
veh7	19	305	286	9086,31	26,82	2272291,54	724755,49
veh15	41	304	263	9121,11	16,09	2214230,16	706238,5
veh39	106	337	231	6636,76	13,85	1574328,46	502136,7
veh4	11	331	320	9524,86	16,85	2193629,72	699667
veh11	30	324	294	9121,11	10,96	1976169,22	630306
veh119	323	400	77	2714,95	5,26	638523,99	203660,21
veh124	337	404	67	2714,95	1,57	679986,57	216886,29
veh78	212	390	178	6227,5	12,21	1618517,04	516233,04
veh43	117	384	267	7729,61	8,4	1562574,32	498389,63
veh54	147	388	241	7592,54	8,44	1699146,06	541949,52
veh50	136	396	260	8268,34	9,39	1852005,11	590704,79
veh118	321	430	109	3429,08	3,57	707852,96	225772,93
veh0	0	408	408	11855,4	23,4	2726288,93	869560,19
veh121	329	461	132	4054,85	6,34	895928,91	285760,81
veh32	87	419	332	12613,97	8,51	3029440,68	966257,74
veh8	22	461	439	11474,31	23,41	2535913,27	808837,79
veh98	266	471	205	6227,5	12,84	1416424,16	451773,56
veh86	234	487	253	7592,54	8,71	1654737,75	527784,68
veh131	356	506	150	5932,55	6,85	1679107,29	535559,28
veh20	55	462	407	12613,97	8,26	2538787,15	809756,97
veh84	228	524	296	7676,12	27,7	1726559,9	550691,18
veh105	285	547	262	7786,7	9,65	1660707,93	529689,33
veh147	399	553	154	5932,55	5,45	1540401,45	491319,18
veh133	361	564	203	6227,5	12,93	1445617,37	461084,93
veh110	299	564	265	9121,13	10,7	2124329,57	677564,36
veh28	353	583	230	6208,2	17,46	1453049,08	463454,18
veh157	426	600	174	6096,48	13,04	1603275,63	511372,87
veh199	540	617	77	2714,95	1,9	611164,95	194934,71
veh182	494	640	146	3794,35	3,95	709064,95	226158,88
veh171	464	645	181	6096,48	11,94	1585398,84	505670,68
veh166	451	653	202	6192,58	8,9	1380407,95	440286,11
veh138	375	662	287	8569,28	19,09	2012461,72	641881,28
veh196	532	680	148	3988,51	4,04	769116,89	245312,68
veh151	410	664	254	6996,3	22,48	1591554,76	507632,36
veh208	565	703	138	3988,51	14,27	778402,74	248274,65
veh161	437	700	263	7592,54	17,68	1651989,15	526907,45
veh169	459	724	265	9121,13	34,12	2417828,86	771175,45

Annexe 11 (Analyses des données des voitures de la simulation avec des limitations de vitesse fixées à 130 km/h) :

Temps de parcours (s/km)	Vitesse moyenne (km/h)	Temps perdu (s/km)	Emissions CO2 (mg/km)	Carburant (mg/km)
32,06060935	112,2873231	1,588233263	230472,6449	73510,10896
33,22722603	108,3448855	2,81543671	255076,0472	81357,38038
30,48793221	118,0795068	0,659875793	210246,5597	67059,05471
36,92762186	97,488	2,73922017	236996,4969	75590,79895
30,83746687	116,7411064	2,043802325	249841,0607	79687,9314
33,84748074	106,3594667	0,809832317	202872,5605	64707,09142
34,7299377	103,6569668	1,907677621	241834,3925	77133,85675
34,53837454	104,2318884	3,41528299	263957,8166	84190,04941
25,09577724	143,4504286	0,917190906	256509,0629	81815,11582
30,17820228	119,2914	1,398759676	252508,3941	80538,47721
30,27960828	118,8918947	0,673322868	220626,0136	70369,78706
28,44689857	126,5515814	3,68155792	280313,3768	89407,09055
32,68034146	110,1579677	0,795924445	205728,9008	65618,2778
31,47592367	114,3731329	2,951693262	250078,5842	79763,45623
28,83420987	124,8516958	1,764039684	242758,8484	77429,00809
34,80614035	103,430026	2,086861661	237213,4083	75659,91538
33,59629433	107,154675	1,769054873	230305,7179	73456,9327
32,23291902	111,6870612	1,201608138	216658,8518	69104,0893
28,36147995	126,9327273	1,937420579	235188,1213	75014,35017
24,67817087	145,8779104	0,578279526	250460,0711	79885,92423
28,58289843	125,9494382	1,96065837	259898,3605	82895,71096
34,54249309	104,2194607	1,08673012	202154,3545	64477,97884
31,74168328	113,4155353	1,111617456	223791,519	71379,2117
31,44524778	114,4847077	1,135657218	223987,5368	71441,7634
31,7869516	113,2540183	1,041095571	206426,4934	65840,67155
34,4146971	104,6064706	1,973784098	229961,7837	73347,18272
32,55360864	110,5868182	1,563559688	220952,4175	70473,8301
26,32002454	136,777988	0,674648822	240165,5212	76602,19106
38,25938117	94,09456948	2,040209825	221007,9098	70491,19206
32,91850662	109,3609756	2,061822561	227446,6736	72544,93135
33,32218204	108,0361423	1,147178678	217942,5792	69513,5857
25,28423696	142,3812	1,154646821	283032,9774	90274,71829
32,26581322	111,573199	0,654829526	201267,8919	64195,25098
38,56114808	93,35821622	3,608593925	224926,1215	71740,82479
33,64711624	106,9928244	1,23929264	213274,9342	68024,8796
25,95848328	138,682987	0,91866061	259652,5019	82817,53715
32,59735046	110,4384236	2,076274589	232134,4633	74040,13328
29,05341772	123,9096906	1,173100263	232902,0165	74285,13353
37,04777552	97,17182609	2,812409394	234053,2006	74651,94098
28,54105976	126,134069	2,138939191	262983,8251	83880,02093
28,36147995	126,9327273	0,699828726	225110,9413	71800,47883
38,47826373	93,55931507	1,041021519	186873,8914	59604,11665
29,68926331	121,2559558	1,958507204	260051,5117	82944,69596
32,61968356	110,3628119	1,437203879	222913,2203	71098,97813
33,49172859	107,4892265	2,227725083	234846,0687	74904,9255
37,10658868	97,01781081	1,012909583	192833,1357	61504,84266
36,30490402	99,16015748	3,213126939	227485,2079	72557,26027
34,59938674	104,048087	3,577777165	195161,2858	62247,46835
34,63926433	103,9283042	2,328601496	217580,5659	69398,04729
29,05341772	123,9096906	3,740764576	265079,9693	84548,2358

Annexe 12 (Echantillon des données des camions de la simulation avec des limitations de vitesse fixées à 130 km/h) :

ID camion	T départ	T d'arrivée	Durée	Distance	Temps perdu	Emission CO2	Carburant
truck14	57	195	138	3992,06	11,63	3888647,87	1223240,61
truck15	62	216	154	3951,61	14,89	4441925,99	1397284,37
truck18	75	216	141	3992,06	6,03	3478179,76	1094109,94
truck2	9	223	214	6640,07	11,15	6332617,43	1992010,89
truck3	13	237	224	6733,7	5,37	5610200,55	1764753
truck29	118	273	155	3986,41	25,83	3263721,61	1026651,31
truck9	37	270	233	6222,87	27,03	7034432,53	2212803,07
truck4	17	313	296	10039,45	10,28	7735263,8	2433210,6
truck10	41	334	293	9084,23	31,08	9386913,89	2952806,02
truck33	135	340	205	6225,4	22,92	6030228,49	1896903,23
truck67	273	417	144	3792,25	19,56	3273830,9	1029831,23
truck82	334	477	143	4052,75	8,81	3612903,93	1136490,91
truck99	403	510	107	2632,98	24,16	3270475,51	1028789,96
truck19	78	487	409	11853,3	28,27	11279165,18	3548015,58
truck80	326	497	171	5930,45	5,89	5044122,82	1586689,06
truck54	220	532	312	8567,18	14,05	7634254,85	2401451,58
truck52	213	581	368	8934,6	22,48	8979197,19	2824539,1
truck84	342	594	252	7590,44	15,98	6624187,97	2083722
truck127	517	652	135	3992,06	5,1	2957019,54	930153,77
truck101	411	666	255	7790,25	11,22	6582412,02	2070587,78

Annexe 13 (Analyses des données des camions de la simulation avec des limitations de vitesse fixées à 130 km/h) :

Vitesse moyenne (km/h)	Temps perdu (s/km)	Emissions CO2 (mg/km)	Carburant (mg/km)	Temps de parcours (s/km)
104,1406957	2,913282866	974095,5472	306418,393	34,56861871
92,3752987	3,768084401	1124080,056	353598,7534	38,9714572
101,9249362	1,510498339	871274,4197	274071,517	35,32011042
111,7021121	1,679199165	953697,3902	299998,4774	32,2285759
108,2201786	0,797481325	833152,7318	262077,7581	33,26551524
92,5875871	6,479514149	818711,9764	257537,8122	38,88210194
96,14734764	4,343654937	1130416,115	355592,0451	37,44253054
122,1014189	1,023960476	770486,8095	242364,9303	29,48368686
111,6151126	3,421313639	1033319,708	325047,4746	32,25369679
109,3240976	3,681691136	968649,1615	304703,8311	32,92961095
94,80625	5,157887797	863295,115	271562,0621	37,9721801
102,0272727	2,173832583	891469,7255	280424,6277	35,28468324
88,58624299	9,175914743	1242119,389	390732,159	40,63836413
104,3322249	2,384989834	951563,2929	299327,2405	34,5051589
124,8515789	0,99317927	850546,3869	267549,5215	28,83423686
98,85207692	1,63997955	891104,7568	280308,2905	36,41805121
87,40369565	2,516061156	1004991,515	316134,9249	41,18818973
108,4348571	2,105279799	872701,4468	274519,2637	33,19965641
106,4549333	1,277535909	740725,2246	233000,9494	33,817127
109,98	1,440261866	844955,1709	265792,2121	32,73322422

Annexe 14 (Comptage routier E42) :

N° Européen	Cum. KJ	Tronçon	Tronçon	PL	a2016	a2016, 24h	PL	a2017	a2017, 24h	PL	a2018	a2018, 24h	PL
E19-E42	64,1	R5 - 25	(R5) (# Jemappes) - St-Ghislain [25]	12.071	76.841	85.442	12.372	77431	86627	12870	76.546	87.246	13.4
E19-E42	70,9	25 - A16 (E42)	St-Ghislain [25] - (A16-E42) (# Hautrage)	12.183	62.617	70.048	12.040	62686	70661	12485	57.317	64.358	13.8
E42	69,0	33 - 34	Tournai Kain [33] - Tournai Froyennes [34]		47.880	52.605	6.615	47.880	52.605	6.615	47.880	52.605	6.6
E42	70,6	34 - A17 (E403)	Tournai Froyennes [34] - (A17-E403) (# Marquain)		47.871	52.605	6.615	47.871	52.605	6.615	47.871	52.605	6.6
E42	73,8	A17 (E403) - 35	(A17-E403) (# Marquain) - Blandain [35]	4.600	26.500	29.500	4.600	26.500	29.500	4.600	26.500	29.500	4.6
E42	75,8	35 - France	Blandain [35] - France	4.600	26.503	29.618	4.600	26.503	29.618	4.600	26.503	29.618	4.6
E42	1,4	A602 (E25) - A604	(A602-E25) (# Loncin) - (A604) (# Grâce-Hollogne)	12.374	92.033	102.097	12.416	92255	103158	13458	92.671	103.814	13.7
E42	3,3	A604 - 4	(A604) (# Grâce-Hollogne) - → Liège Airport [3]	9.672	67.732	74.798	9.643	69488	77821	10643	55.115	62.053	8.7
E42	5,2	3 - 4	→ Liège Airport [3] - Flémalle [4]	10.006	68.974	75.853	10.215	67892	75114	10372	54.968	61.497	8.4
E42	7,1	4 - 5	Flémalle [4] - St-Georges [5]	7.343	58.192	63.966	8.364	58715	65820	9019	57.946	65.212	9.6
E42	12,8	5 - 6	St-Georges [5] - Villers-le-Bouillet [6]	7.352	50.969	56.182	7.379	51230	57792	7918	52.658	60.134	9.1
E42	19,6	6 - 7	Villers-le-Bouillet [6] - Huy-Braives [7]	8.763	48.357	53.315	8.855	48532	54274	9303	47.994	53.767	9.4
E42	29,1	7 - 8	Huy-Braives [7] - Huy-Héron [8]	7.413	43.789	48.328	7.751	44014	48724	8349	41.947	47.453	7.7
E42	34,5	8 - 9	Huy-Héron [8] - Andenne [9]	7.302	46.127	50.831	8.007	47732	53514	8480	50.180	56.916	9.4
E42	36,3	9 - 10	Andenne [9] - Hingeon [10]	8.030	47.403	52.361	8.805	46888	52582	9.325	43.468	47.692	8.4
E42	39,6	10 - 10a	Hingeon [10] - Fernelmont [10a]	7.873	49.823	54.942	6.904	48265	53779	7032	40.056	43.366	5.6
E42	46,9	10a - A4 (E411)	Fernelmont [10a] - (A4-E411) (# Daussoix)	8.811	53.143	58.589	10.085	53334	59474	10420	47.185	52.368	8.6
E42	49,9	A4 (E411) - 12	(A4-E411) (# Daussoix) - Namur [12]	11.169	57.761	63.496	11.397	59790	66718	12361	54.314	61.370	11.6
E42	59,4	12 - 13	Namur [12] - Spy [13]	10.760	57.143	63.189	11.513	57627	64505	11969	56.010	61.308	11.6
E42	61,2	13 - 14	Spy [13] - Sambreville [14]	10.771	56.926	63.150	11.082	58779	65908	11686	59.684	67.164	12.0
E42	72,7	14 - 15	Sambreville [14] - Fleurus [15]	11.762	66.097	73.153	11.756	67147	74915	12389	66.904	74.744	11.6
E42	74,4	15 - R3	Fleurus [15] - (R3) (# Heppignies)	12.175	72.746	80.494	12.865	73421	81833	13549	73.057	81.783	12.6
E42	76,4			10.526	53.176	58.637	10.826	53294	59623	11471	53.962	60.440	11.6
E42	77,2	R3 - 16	(R3) (# Heppignies) - Gosselies Nord [16]	12.081	72.683	80.663	12.429	73322	82268	13332	76.522	85.880	13.6
E42	80,5			11.863	63.795	71.113	12.483	64937	73354	13584	66.426	74.962	13.6
E42	82,0	16 - A54 (E420)	Gosselies Nord [16] - (A54-E420) (# Thiméon)		51.395	54.263	9.525	55569	613				
E42	83,8	A54 (E420) - 171	(A54-E420) (# Thiméon) - Courmoules [171]		70.308	78.548	11.840	71236	794				

Annexe 15 (Calcul trafic OSMWebWizard) :

SUMO supports various modes of transport. At the demand generation panel, you can activate/deactivate the individual modes of transport by clicking the corresponding checkboxes. For each mode of transport, the OSM Web Wizard generates random demand based on a certain probability distribution, which is influenced by two parameters:

- Every time a new vehicle is generated, the OSM Web Wizard randomly chooses a departure and arrival edge for the vehicle. The *Through Traffic Factor* defines how many times it is more likely for an edge at the boundary of the simulation area being chosen, compared to an edge entirely located inside the simulation area. A big value for the *Through Traffic Factor* implies that many vehicles depart and arrive at the boundary of the simulation area, which corresponds to a scenario with a lot of through traffic.
- The *Count* parameter defines how many vehicles are generated per hour and lane-kilometer. Assuming
 - the network contains 3 edges with a combined length of 5 km
 - that each has 2 lanes which allows the current traffic mode
 - and the count value is set to 90,
 - then $5 * 2 * 90 = 900$ vehicles per hour will be generated. This translates to a *randomTrips* parameter of $p=4$ which means a new vehicle is inserted every 4 seconds somewhere in the network.

The next step is generating and running the scenario.