



IBSR

Les limitations de vitesse sur autoroute sont-elles encore pertinentes ?

Effets de l'adaptation des limites de vitesse sur les autoroutes belges sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement

Remerciements

Les auteurs de ce rapport et l'Institut Belge pour la Sécurité Routière souhaitent remercier les personnes et organismes suivants pour leur contribution à cette étude :

- Les Régions bruxelloise, flamande et wallonne pour leur collaboration
- Mme Caroline Pourtois (Centre Perex) pour la collaboration concernant l'acquisition des données de trafic du centre Perex
- M. Stefaan Hoornaert (MOW) pour la collaboration concernant l'acquisition des données de trafic du Vlaams Verkeercentrum
- La société Stratec pour leur travail de modélisation
- La société NSI pour leur travail d'extraction des données de trafic
- M. Gregory Vandebulcke-Plasschaert (Police Fédérale), reviewer externe.
- M. Philip Temmerman (IBSR), M. Ludo Kluppels (IBSR), Mme Annelies Develtere (IBSR), M. Stijn Daniels (IBSR), M. Peter Silverans (IBSR), M. Jean-François Gaillet [IBSR] et M. Wouter Van den Berghe [IBSR], reviewers internes
- Mme Véronique Verhoeven (IBSR), pour la traduction du document.

Les limitations de vitesse sur autoroute sont-elles encore pertinentes ?

Effets de l'adaptation des limites de vitesse sur les autoroutes belges sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement

Rapport de recherche n° 2017 - R - 04 – FR
D/2017/0779/27

Auteurs: Julien Leblud, Quentin Lequeux, Freya Sloomans, Marc Broeckaert, Julie Maes et Marie Trotta.

Éditeur responsable: Karin Genoe

Éditeur: Institut Belge pour la Sécurité Routière – Centre de Connaissance Sécurité Routière

Date de publication: 18/05/2017

Veillez faire référence au présent document: de la manière suivante: Leblud J., Lequeux Q., Sloomans F., Broeckaert M., Maes J. et Trotta M. (2017) Les limitations de vitesse sur autoroute sont-elles encore pertinentes ? Effets de l'adaptation des limites de vitesse sur les autoroutes belges sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement. Bruxelles, Belgique: Institut Belge pour la Sécurité Routière – Centre de Connaissance Sécurité Routière

Dit rapport is eveneens beschikbaar in het Nederlands onder de titel: Zijn de snelheidslimieten op autosnelwegen nog relevant? Effecten van de aanpassing van de snelheidslimieten op de Belgische autosnelwegen op de mobiliteit, de verkeersveiligheid en het milieu.

A summary of this report is also available in English under the title: Are Speed limits on motorways still relevant? Study on the effects of speed limits changes on Belgian motorways on mobility, road safety and environment.

Cette recherche a été rendue possible par le soutien financier du Service Public Fédéral Mobilité et Transports.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	5
1 Introduction	7
1.1 Contexte de cette étude	7
1.2 Méthodologie	7
1.3 Structure du rapport	7
1.4 Limites de l'étude	8
2 Situation actuelle en Belgique	9
2.1 Les autoroutes	9
2.1.1 Le concept de l'autoroute dans les règlements de la circulation.	9
2.1.2 Tour d'horizon des autoroutes belges	9
2.2 Réglementation par région	11
2.2.1 Région flamande	11
2.2.2 Région wallonne	12
2.2.3 Région de Bruxelles capitale	13
2.3 Infrastructure et technologie autoroutières belges	13
2.3.1 Infrastructure	13
2.3.2 Technologie	13
2.4 Trafic actuel sur autoroute	14
2.5 Accidentalité sur autoroute	15
2.6 Le comportement de vitesse sur les autoroutes	16
2.6.1 Résultats de la mesure de vitesse de l'IBSR de 2011	16
2.6.2 Résultats de la mesure de vitesse de 2015	19
2.6.3 Évolution des comportements dans le cadre d'un changement de limitation	19
2.7 Synthèse	20
3 États de l'art: synthèse de littérature internationale	21
3.1 Introduction	21
3.2 Principes et définitions	21
3.3 Limites de vitesse variables	22
3.4 Effets de la vitesse et de l'homogénéité de la vitesse sur la mobilité	24
3.5 Effets de la vitesse et de l'homogénéité de la vitesse sur la sécurité routière	26
3.5.1 Effets de la vitesse	26
3.5.2 Effets de la variabilité des vitesses	30
3.6 Effets de la vitesse et de l'homogénéité de la vitesse sur l'environnement	32
3.6.1 Introduction	32
3.6.2 Impact de la vitesse sur l'émission de CO ₂ et de polluants atmosphériques	32
3.6.3 Impact de la vitesse sur la pollution sonore	35

3.7	Effets des vitesses variables dynamiques sur la sécurité, la mobilité et l'environnement	35
3.8	Synthèse	38
4	Vitesse et adaptation des vitesses en europe	39
4.1	Vue d'ensemble	39
4.2	Technologie de l'adaptation de vitesse en Europe	41
4.3	Situation dans quelques pays européens	43
4.3.1	Les Pays-Bas	43
4.3.2	Allemagne	43
4.3.3	Autriche	44
4.3.4	La France	45
4.3.5	Synthèse	46
4.4	Transférabilité des principes européens aux routes belges	46
4.4.1	Comparaison de l'infrastructure autoroutière et de l'accidentalité sur autoroute entre les pays européens	46
4.4.2	Comparaison des attitudes entre pays européens.	49
4.4.3	Synthèse	52
5	Simulation des hypothèses de changement de limitations de vitesse	54
5.1	Introduction à la modélisation du trafic	54
5.2	Modélisation du trafic routier	55
5.2.1	Principes de base	55
5.2.2	Courbe vitesse-débit	55
5.2.3	Calage et validation d'un modèle	56
5.3	Variables de sortie des modèles utilisés	56
5.3.1	Mobilité	56
5.3.2	Sécurité routière	56
5.3.3	Environnement	57
5.3.4	Modèle de référence et scénario	57
5.4	Limitations des simulations	58
5.5	Résultats des simulations	58
5.5.1	Mobilité	58
5.5.2	Sécurité routière	64
5.5.3	Environnement	66
5.6	Synthèse des modélisations	67
6	Conclusion et recommandations	70
6.1	La Belgique dans le contexte européen	70
6.2	La vitesse dans la sécurité routière, l'environnement et la mobilité	70
6.3	Infrastructures nécessaires à la modification dynamique de la limitation de vitesse	71
6.4	Effets des modifications des vitesses en Belgique	71

6.5	Acceptabilité et mise en place de modification de vitesse en Belgique	73
6.6	Recommandations	73
	Liste des tableaux et figures	75
	Références	78

RÉSUMÉ

But et méthodologie

L'objectif de cette étude est d'investiguer la possibilité et la désirabilité de modifier les limitations de vitesse sur les autoroutes belges, en confrontant ces modifications à leur impact sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement.

L'étude est organisée de la manière suivante. La première partie décrit la situation sur autoroute en Belgique. Plus précisément, elle décrit d'abord la réglementation actuelle en matière de vitesse au niveau fédéral et régional ainsi que les technologies de l'infrastructure routière permettant la surveillance des vitesses pratiquées et de l'adaptation de celles-ci aux conditions de trafic. Elle dresse ensuite un état des lieux du trafic et de l'accidentalité actuels sur les autoroutes belges. Enfin, la réglementation est confrontée aux vitesses réellement pratiquées par les Belges au travers de la mesure des résultats de la mesure de comportement vitesse.

La deuxième partie identifie les effets de la vitesse en général, de l'application de vitesses variables et d'un changement de limitation sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement au travers d'une analyse de la littérature belge et internationale.

Le réseau autoroutier belge s'intègre dans le plus vaste réseau européen. Les réglementations varient dans chaque pays et évoluent également. L'analyse de l'adaptation des vitesses dans d'autres pays européens permet dès lors d'identifier les bonnes pratiques et d'enrichir l'étude par l'expérience d'experts internationaux travaillant sur la problématique de la vitesse. Il s'agit également de voir comment la vitesse et son respect sont appréhendés par les Belges et comment ils se situent par rapport aux autres conducteurs européens.

À la lumière de ces premières informations, une synthèse ayant pour but de connaître la transférabilité au réseau autoroutier belge a été réalisée. Des hypothèses quant aux modifications de vitesses sur le réseau autoroutier belge ont été sélectionnées.

La société Stratec a été engagée pour la mise en place d'un modèle de réseau autoroutier belge grâce auquel les hypothèses de travail ont pu être simulées et leurs effets sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement ont pu être mis en évidence.

Résultats clés

La présente étude a permis dans un premier volet de mettre en évidence que les limitations de vitesse dynamiques participaient à une fluidification du trafic dans bon nombre d'études, ce qui avait un impact bénéfique pour la mobilité, la sécurité routière et l'environnement. Dans cette revue de la littérature, il n'a pas été trouvé d'avantage tangible à l'augmentation de la vitesse limite sur nos autoroutes : en effet, une augmentation de la vitesse entraîne une augmentation du risque et de la gravité des accidents, une augmentation des émissions de gaz polluants et enfin n'a que peu d'impact sur le gain de temps des trajets (a fortiori dans un pays de la taille de la Belgique).

Les simulations ont montré qu'en appliquant des diminutions progressives de vitesses limites, on pouvait améliorer significativement les durées globales de trajets sur le réseau belge (jusqu'à 25%), la sécurité routière (-6% de tués) et l'environnement (diminution des émissions de CO, CO₂, particule fines et composés volatiles organiques). L'étude a aussi confirmé que le passage à une vitesse limite de 130 km/h n'aurait que peu d'impact sur la mobilité, mais un impact nul sur la sécurité routière, grâce à un report de trafic des nationales vers les autoroutes. L'augmentation à 130 km/h a aussi un impact négatif sur les émissions de gaz polluants. Par ailleurs, une partie de la population pourrait être tentée d'augmenter sa vitesse sur autoroute et serait de nouveau au-delà de la vitesse maximale autorisée, ce qui c'est-à-dire au-delà de 130 km/h, augmentant le risque et la gravité des accidents.

Enfin, ce projet de recherche a pu aussi mettre en lumière le fait que le développement actuel des technologies sur le réseau routier et autoroutier belge ne peut qu'encourager la poursuite d'études dans le domaine des limitations de vitesse dynamiques.

Recommandations clés

Cette étude sur la possibilité et le bénéfice de modifier les limitations de vitesse en Belgique a permis de mettre en évidence que de telles modifications ont des effets significatifs sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement.

La diminution progressive des limitations de vitesse dans les zones congestionnées semble améliorer efficacement le flux de trafic et l'homogénéité de celui-ci. Il en résulte une meilleure vitesse moyenne, un gain de temps important, un gain pour la sécurité (moins d'interactions entre véhicules) et une diminution de la pollution. Cette mesure devrait donc être encouragée, d'autant plus qu'elle fait déjà ses preuves à l'étranger. Il serait intéressant d'investiguer plus en détail les effets de telles modifications sur les principales zones de congestions du territoire belge (en étudiant par exemple l'homogénéité du trafic lors d'alertes SMOG). Il faudrait, de plus, informer les usagers du gain collectif de telles mesures, qui ne se ressent pas forcément au niveau individuel.

De plus, sur certaines autoroutes peu congestionnées, où les vitesses observées entre 22h et 6h sont souvent supérieures à 120 km/h, il serait possible d'augmenter la vitesse maximale autorisée à 130 km/h. Cependant le seul avantage observé serait une petite amélioration de la mobilité durant cette période. Il faudrait alors mieux accompagner les conducteurs (changement de comportement) par des campagnes de sensibilisation. En effet, les Belges ont tendance à dépasser les limitations et à sous-estimer les risques liés à la vitesse (études ESRA). Des radars tronçons devraient alors aussi participer à cet accompagnement : Un contrôle strict serait nécessaire pour être certain que les vitesses (plus élevées) sont respectées. Néanmoins cette dernière mesure n'offre que de maigres avantages au regard des désavantages : augmentation du risque qu'elles impliquent (un accident plus rapide est un accident souvent plus grave) et augmentation de la pollution.

Enfin, il est intéressant de noter que les mesures de diminution progressives de vitesse et d'augmentation de vitesse dans les zones peu congestionnées ne s'excluent pas mutuellement. Il serait tout à fait possible d'appliquer les deux en synergie, puisque les zones considérées pour ces mesures sont totalement différentes.

Ces modifications (à la hausse ou à la baisse) devront s'accompagner sans aucun doute d'une information auprès des usagers, afin qu'ils comprennent pourquoi ils doivent adapter leur vitesse et respecter scrupuleusement les limitations, pour expliciter les gains de chacun avec de telles mesures, et enfin pour montrer l'ampleur des gains collectifs lors du respect des vitesses imposées.

Enfin, la présente étude, même si elle repose sur des modélisations et doit donc être interprétée avec prudence, permet de participer au débat vers la mise en place d'une modification de limitations de vitesse en Belgique, et supporte tous les efforts des Régions en termes de modernisations de l'infrastructure. Il serait important maintenant de faire d'autres études en se focalisant sur les zones les plus congestionnées et/ou les plus accidentogènes (par exemples les chantiers, zones où les vitesses non adaptées entraînent souvent des accidents), afin de maximiser les gains liés à la mise en place de ces mesures.

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte de cette étude

En février 2016, le Ministre Fédéral de la mobilité a demandé à l'IBSR de réaliser une étude sur (1) l'opportunité et la désirabilité de modifier les limitations de vitesse sur autoroute et (2) déterminer quand de telles modifications seraient opportunes. Pour être plus précis, cette étude a pour objectif de déterminer si l'adaptation de la vitesse sur autoroute peut contribuer à améliorer la mobilité, la sécurité routière et diminuer l'impact de la circulation sur l'environnement.

Actuellement la limitation légale pour les véhicules dont la masse est inférieure à 3,5 t est fixée à 120 km/h, avec quelques règlements particuliers tels qu'une diminution de la vitesse maximale sur certains rings (Anvers, Bruxelles), sur certaines sections (par exemple dans les virages) mais aussi lors de phénomènes particuliers (alerte SMOG par exemple). Cette limitation à 120 km/h a été créée en 1972 afin de limiter la consommation de carburant durant le premier choc pétrolier.

L'adaptation des vitesses en fonction des conditions de circulation n'est pas un phénomène nouveau. Par exemple, aux Pays-Bas, certaines sections d'autoroute sont limitées à 130 km/h, d'autres à 120 ou 100 km/h ; sur certaines sections la limite de 100 km/h ne s'applique pas la nuit. La France applique une vitesse maximale différente en fonction des conditions météorologiques (110 km/h vs. 130 km/h). Bien d'autres pays appliquent déjà des limitations de vitesse différentes en fonction des conditions du trafic, etc. (voir sections suivantes). Il semble donc intéressant d'investiguer l'impact de telles mesures sur le sol belge.

De manière générale, les effets de la vitesse sur la sécurité routière, la mobilité et l'environnement sont bien documentés dans la littérature scientifique. De manière succincte, une augmentation de la vitesse entraîne une augmentation du risque et de la gravité des accidents, une augmentation de la pollution liée aux gaz d'échappement, et à une diminution du flux de voitures (donc une diminution de la mobilité) notamment parce que les distances de sécurité (inter distance) doivent augmenter quand la vitesse est plus importante.

Les limitations de vitesse dynamiques (c.-à-d. adaptées en temps réel aux conditions de circulation) semblent d'emblée être une solution envisageable pour mettre en place une stratégie d'optimisation des vitesses.

Bien entendu, ce type d'installations requiert des technologies modernes liées à l'infrastructure autoroutière : quantification du flux de véhicules, avertisseurs de vitesses pour les usagers, systèmes de transports intelligents (*Intelligent Transportation Systems* - ITS) tels que les panneaux à messages variables, définitions des conditions météorologiques, etc. Mais dans ce domaine, la Belgique est en pleine mutation et pourrait donc supporter ce genre de modification : caméras ANPR (Automatic Number Plate Recognition) pour le télépéage des camions, centre du Vlaamse Verkeerscentrum, centre PEREX 4.0 en Wallonie, etc.).

1.2 Méthodologie

Le rapport s'appuie sur 3 piliers complémentaires. Tout d'abord, une revue de la littérature poussée qui a pour objectif de synthétiser les connaissances en matière d'effets des vitesses et des modifications de vitesse sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement. Ensuite, une synthèse des méthodes employées dans les pays européens ainsi que des interviews d'experts étrangers ont permis de profiter de l'expérience de ces pays en la matière. Enfin, un partenariat avec la société Stratec a permis, sur base d'une simulation informatique du réseau autoroutier belge, de tester les hypothèses de travail en matière de modification de vitesses et d'en étudier les effets sur les trois thèmes.

1.3 Structure du rapport

Le rapport se structure en différents volets. Tout d'abord, un rappel des réglementations en matière d'autoroute a été résumé, ainsi qu'un état des lieux des différents grands axes belges. Les réglementations régionales, ainsi que les organismes compétents en la matière y sont aussi rappelés.

Ensuite, une revue de la littérature a été effectuée afin de mettre en évidence les effets connus de la vitesse, des variations de vitesse et des limitations de vitesse dynamiques sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement. Un tour d'Europe a aussi été effectué afin de voir les bonnes pratiques de nos voisins en la matière.

À la lumière de ces résultats, une synthèse a été réalisée sur les méthodes pouvant éventuellement être appliquées à la Belgique, méthodes devant maximiser les effets bénéfiques sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement. Des hypothèses de travail ont ainsi pu être définies.

S'agissant d'une étude pionnière en Belgique, et dans une volonté d'innovation et d'étude profonde de la question, une collaboration avec la société Stratec a été établie afin de modéliser le réseau autoroutier belge et de pouvoir tester différentes hypothèses de travail concernant des variations de vitesse, toujours dans l'optique d'en étudier l'impact sur la sécurité routière, la mobilité et l'environnement.

Le rapport discute ensuite des résultats de ces modélisations en parallèle avec ce qui est observé dans la littérature, afin de définir des modifications de vitesses qui seraient les plus efficaces, mais qui serait aussi réalisable sans modifications trop importantes de l'infrastructure actuelle.

Les principales recommandations sont établies à la lumière de cette discussion.

1.4 Limites de l'étude

Cette première étude a pour objectifs de dresser des tendances principales et d'ouvrir la porte à d'autres projets de recherche plus ciblés en la matière.

Ce rapport traite de la Belgique en général, et il sera intéressant dans un second temps de se concentrer sur des zones plus restreintes, qui seront définies sur bases de ces premiers résultats. Les effets des modifications de limitations de vitesse auront bien évidemment leurs principaux avantages dans les zones fortement congestionnées.

De même, il faudra garder à l'esprit que, par définition, les simulations effectuées restent une représentation de la réalité, et non la réalité elle-même. Elles prennent en compte le trafic de 2016 et la tendance en matière de déplacement actuelles. Il est donc évident que les résultats observés ne pourront sans doute pas être obtenus à l'identique sur le réseau autoroutier belge. Néanmoins, ces simulations permettent de faire des bilans et de montrer de grandes tendances qu'il serait impossible de prédire, tant le nombre de facteurs intervenant est important.

Ce rapport doit être une première étape vers d'autres études destinées à mesurer les effets d'une modification de vitesse sur le réseau autoroutier belge.

2 SITUATION ACTUELLE EN BELGIQUE

2.1 Les autoroutes

2.1.1 Le concept de l'autoroute dans les règlements de la circulation.

Le terme "**autoroute**" désigne la voie publique dont le commencement ou l'accès est indiqué par le signal F5 et dont la fin est indiquée par le signal F7.



Figure 1: Panneau signalant le début (F5) et la fin (F7) d'une autoroute en Belgique.

Le code de la route définit les règles de conduites pour tous les usagers de la route. Ce code sert de cadre de référence pour la définition et la répression des infractions. Le code de la route comprend une série de règles de conduite applicables sur tout le territoire belge. Il décrit également la signalisation routière (feux de circulation, panneaux de signalisation et les marquages routiers) qui sont en outre précisés localement. Les régions ont également la possibilité d'établir des réglementations locales (par ex. une limitation plus basse sur les rings, ou lors de concentration de polluants, etc.).

Le code définit les règles générales sur les limitations de vitesse; ces compétences ont été dernièrement transférées aux régions. En effet, depuis la sixième réforme de l'État, la compétence du niveau fédéral se limite à la définition de la limitation de vitesse sur les autoroutes.

Conformément au schéma des règlements de la circulation, les autorités routières « peuvent localement fixer des limites de vitesse inférieures au régime de vitesse habituel ». Dans les limitations générales, on notera qu'une limitation générale de vitesse de 120 km/h est appliquée sur autoroute. On note aussi une limitation spécifique pour certains véhicules. Les véhicules de plus de 3,5 tonnes, autobus et autocars ne peuvent pas dépasser 90km/h sur autoroute. De même, il existe une règle générale quant à la vitesse minimale autorisée sur autoroute : elle est égale à 70 km/h pour les véhicules légers.

Si une autoroute a trois voies ou plus, les camions dont la masse est supérieure à 3,5 tonnes ou dont la longueur est supérieure à 7 mètres doivent rester sur la première ou la deuxième voie. À la frontière, un panneau donnant un aperçu des limites de vitesse générales doit être présent : limitations sur routes, dans les agglomérations, sur les routes rurales et sur les autoroutes.

2.1.2 Tour d'horizon des autoroutes belges

La Figure 2 présente les autoroutes traversant le territoire belge. La longueur totale (autoroutes et rings péri-urbain) égale à 1763 km.

Autoroutes et Rings en Belgique

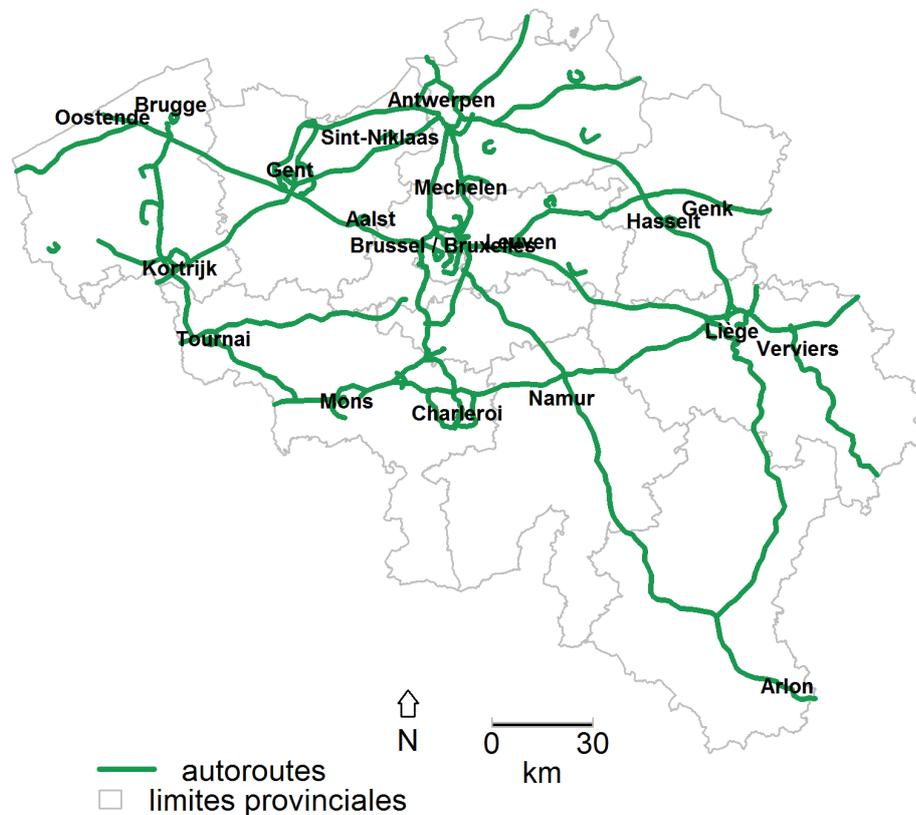


Figure 2: Autoroutes et rings traversant le territoire belge (Adapté du réseau Stratec, 2016).

Presque la totalité des autoroutes belges font partie du réseau européen de routes-E (nomenclature unifiée pour toute l'Europe). Les routes-E ne sont pas toujours des autoroutes, mais sur le territoire belge c'est toujours le cas.

Le Figure 2 présente toutes les autoroutes traversant la Belgique.

Tableau 1: Autoroutes traversant le territoire belge

Nomenclature belge	Nomenclature européenne	Principales villes traversées
A3	E40	Calais – Oostende – Gent- Brussel – Liège – Aachen - ... - Ridder
A21	E34	Zeebrugge – Antwerpen – Eindhoven - ... - Bad Oeynhausen

A15 –A16	E42	Dunkerque – Lille – Mons – Charleroi – Namur – Liège – Sankt-Vith – Wittlich - ... - Aschaffenburg
A25-A26	E25	Hoek van Holland - ... - Maastricht – Liège – Bastogne – Arlon – Luxembourg - ... - Palermo
A14	E17	Antwerpen – Gent – Kortrijk – Cambrai – Reims – Beaune
A1	E19	Amsterdam - ... - Breda – Antwerpen – Brussel – Mons – Valenciennes – Paris
A13	E313	Antwerpen – Liège
A2	E314	Leuven – Hasselt – Heerlen – Aachen
A17	E403	Zeebrugge – Brugge – Kortrijk – Tournai
A17	E404	Jabbeke – Zeebrugge
A28	E411	Brussel – Namur – Arlon – Longwy – Metz
A54	E420	Nivelles – Charleroi – Reims
A27	E421	Aachen – Sankt-Vith – Luxembourg
A8	E429	Tournai - Halle

2.2 Règlementation par région

Les décisions en matière d'autoroutes ne sont pas directement contrôlées par des accords internationaux ou par la politique de l'UE. Néanmoins l'Europe garde un œil sur le réseau autoroutier de ses pays membres au travers d'audits¹.

En Belgique, les limites de vitesse générales sont déterminées par le Ministre Fédéral de la Mobilité. Dans la 6ème réforme de l'État, les compétences générales en matière de réglementations sur autoroute sont restées fédérales. Néanmoins chaque région peut diminuer les vitesses en fonction de certains critères (tels que la pollution, le trafic, *etc.*).

2.2.1 Région flamande

En région flamande, il existe 883 km d'autoroutes. Un certain nombre de services publics sont compétents en matière de vitesse sur autoroute : le département Mobiliteit en Openbare Vervoer (MOW), le Vlaams Verkeerscentrum (VVC) et l'Agentschap Wegen en Verkeer (AWV).

La gestion dynamique du trafic est une préoccupation particulière dans la politique flamande. L'objectif opérationnel « OOD2-Uitbouw van Dynamisch Verkeersmanagement (OOD2-Expansion de la gestion dynamique du trafic) », dans la gestion de l'agence des routes et du trafic (AWV) pour 2011 à 2015, prévoit

¹ http://ec.europa.eu/transport/road_safety/topics/infrastructure_fr

notamment le développement de signes dynamiques sur la route ainsi que la production de messages variables. L'objectif est défini dans le document politique «Uitbouw van dynamisch verkeersmanagement op het Vlaamse autowegennet (Développement de la gestion dynamique de la circulation sur le réseau routier flamand) », préparé par le VVC en 2008.

Il existe en région flamande des réductions de vitesses lorsque la pollution atmosphérique devient importante. Ces alertes, dite alarmes SMOG, sont gérées par la Cellule Interrégionale de l'Environnement. Si la concentration moyenne en particules dépasse $70 \mu\text{g} / \text{m}^3$ durant 2 journées consécutives, l'alarme SMOG est activée : cela signifie une diminution de la vitesse maximale autorisée à 90 km/h (Figure 3).

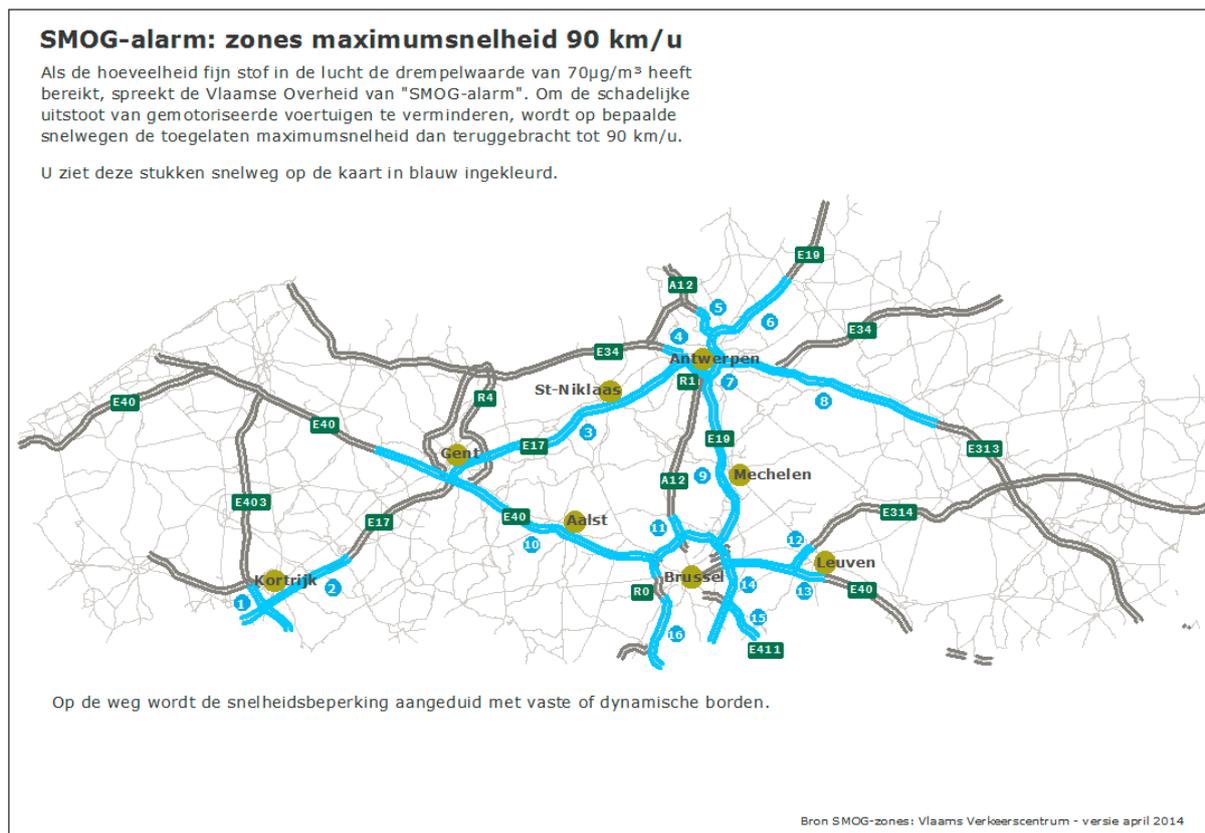


Figure 3: Zones soumises aux limitations SMOG en région flamande. Source : Vlaams Verkeerscentrum

2.2.2 Région wallonne

En Wallonie, il existe 869 km d'autoroutes. Les services publics compétents en matière de vitesses sont regroupés dans la DGO1, la Direction Générale Opérationnelle des Routes et des Bâtiments.

De manière générale, la Wallonie suit la réglementation fédérale qui fixe la limite de vitesse à 120 km/h. Le Ministre Régional de la Mobilité est l'autorité compétente pour une éventuelle modification de cette règle.

Tout comme en Flandre, certaines conditions particulières de pollution peuvent entraîner, par exemple, une diminution de la vitesse maximale autorisée. Ces alertes SMOG, sont apparues en 2007 en Wallonie afin de faire face à l'augmentation des gaz nocifs dans l'air. Seuls certains tronçons d'autoroute sont concernés par ces alertes SMOG (Figure 4). La vitesse maximale est limitée à ce moment à 90 km/h.

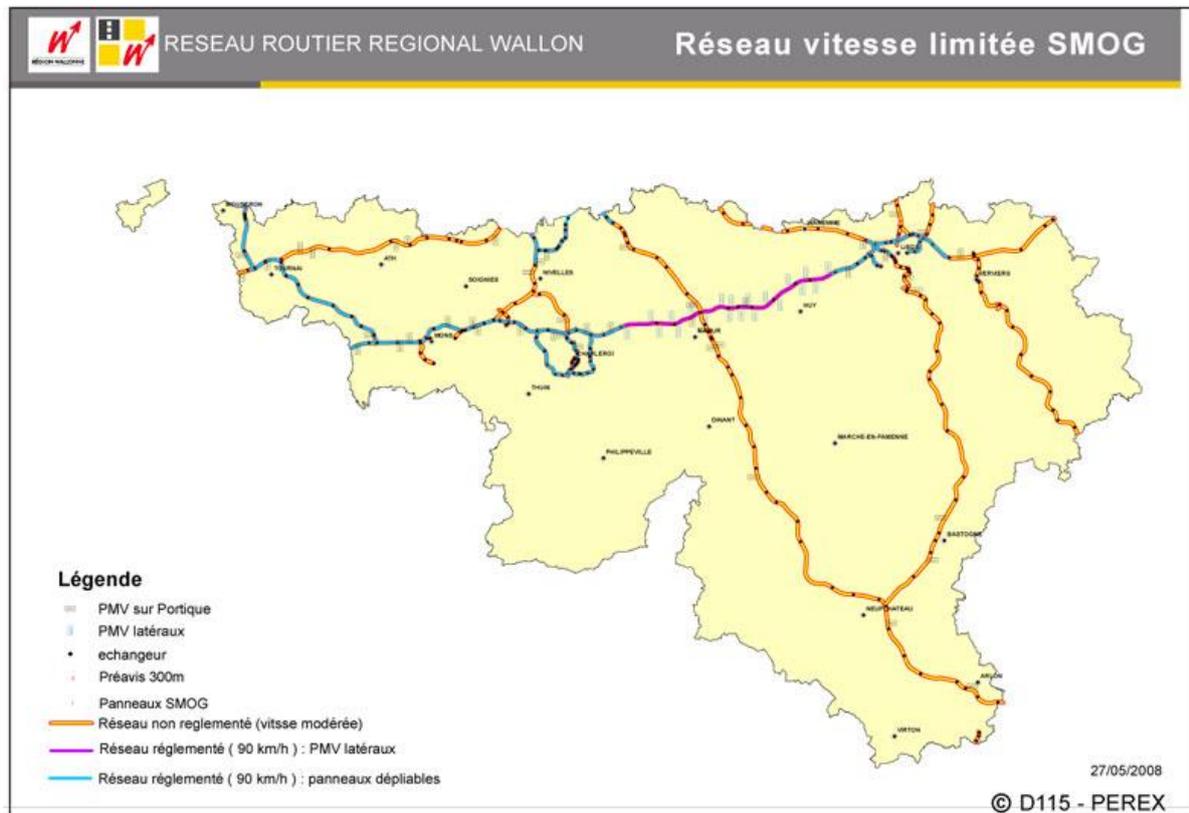


Figure 4: Réseau autoroutier wallon soumis aux alertes SMOG².

2.2.3 Région de Bruxelles capitale

La Région de Bruxelles capitale ne comporte que 11,3 km de voiries autoroutières. Dans ce contexte, elle se réfère principalement aux règles générales en matière autoroutière et il n'existe pas de prescription particulière concernant ce réseau.

2.3 Infrastructure et technologie autoroutières belges

2.3.1 Infrastructure

Les chapitres précédents décrivent les autoroutes présentes en Belgique. Les infrastructures autoroutières sont construites selon des prescriptions de la Commission Européenne, qui veille au bon état de celles-ci à travers toute l'Europe (Adminaite et al., 2015). Les infrastructures belges ne dérogent pas à la règle.

2.3.2 Technologie

Certaines technologies de transmission d'informations vers les utilisateurs de la route sont présentes depuis de nombreuses années. On notera les systèmes RDS-TMC qui, couplés aux autoradios et GPS embarqués, permettent d'avertir des événements tels que les chantiers, les gros embouteillages, etc.

² <http://routes.wallonie.be/listeFiche.do?action=1&origine=1&shortId=1270&axeSec=5>

Des stations météo sont aussi présentes le long des autoroutes afin de monitorer les conditions météorologiques difficiles. Les limitations de vitesse peuvent ainsi être adaptées aux conditions météorologiques dans ces zones où les stations météo sont présentes.

Le trafic sur les autoroutes en Belgique est suivi et partiellement géré à l'échelle régionale par le centre Perex en Wallonie, le VVC (Vlaams Verkeerscentrum) en Flandre et Mobiris (Bruxelles Mobilité) en région bruxelloise.

En Flandre, le VVC monitor le trafic grâce à une surveillance caméras, des boucles de comptage et des sources complémentaires. Comme on peut le voir sur la Figure 5, le réseau flamand est bien couvert par les boucles de comptage, surtout au niveau des axes à fort trafic que représentent les liaisons Anvers-Bruxelles, Gand-Bruxelles, Anvers-Gand ainsi que le R0 autour de Bruxelles.

En Région wallonne, l'ambition est de moderniser la gestion du trafic avec le centre Perex 4.0 qui prévoit une rénovation importante des équipements présents sur les réseaux devant débuter en 2017 et comprenant notamment :

- un accroissement du nombre de boucles de comptage, permettant de comptabiliser les flux de trafic ;
- une modernisation du parc d'équipements dynamiques, nouveaux panneaux à messages variables permettant de mieux communiquer auprès des usagers ;
- le placement de signalisations dynamiques d'affectation de voie en cas de fermeture d'une bande de circulation pour sécuriser le réseau lors d'un incident ou de travaux (exemple : dans la liaison E25-E40 actuellement) ;
- l'installation de caméras de contrôle supplémentaires.

L'objectif est de parvenir à une gestion en temps réel du trafic sur les autoroutes wallonnes.

Le gouvernement fédéral a également pris la décision d'installer des caméras ANPR sur le réseau autoroutier avec pour objectif initial la lutte contre le terrorisme. L'installation de ces caméras pourrait aussi fournir des informations sur les conditions de trafic.

Ces diverses initiatives montrent que les volontés politiques convergent vers la mise en place d'un système de transport intelligent permettant une gestion dynamique du trafic.

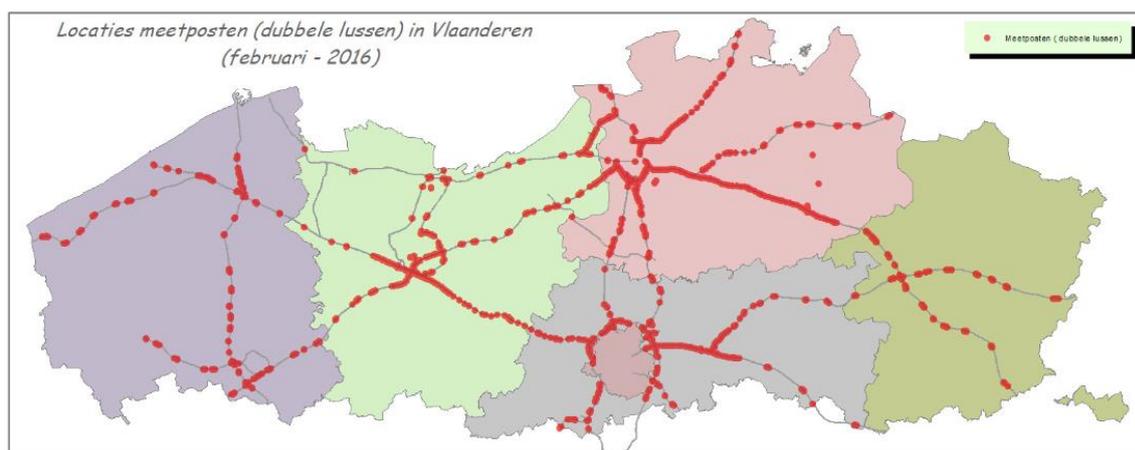


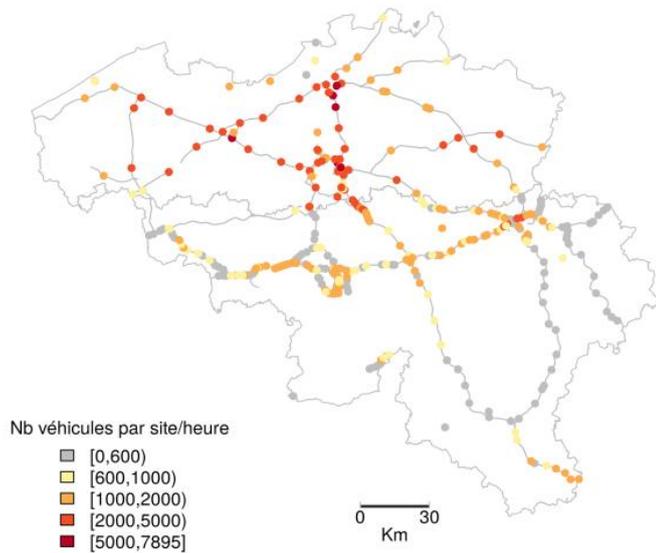
Figure 5: Localisation des boucles de comptage (à double induction) sur le territoire flamand.

2.4 Trafic actuel sur autoroute

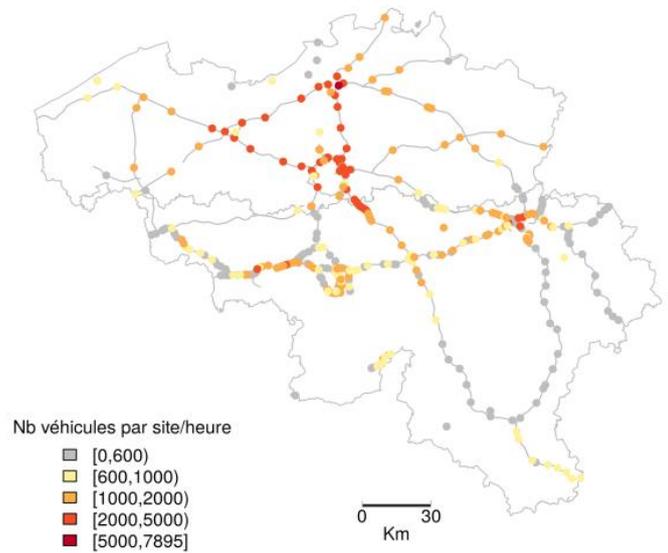
Les centres Perex et du Vlaams Verkeerscentrum ont permis d'obtenir des données de trafic datant de 2016 sur le réseau autoroutier belge, grâce à leurs boucles de comptage. La Figure 6 illustre les résultats à

différentes heures de la journée. Un trafic supérieur à 2000 véhicules par heure sera considéré comme dense. On constate qu'en Belgique (et particulièrement en Flandre), le réseau est saturé non seulement en heure de pointe mais aussi en heure creuse. Le trafic ne se fluidifie réellement que durant les heures de nuit.

Volume de trafic horaire par site - véhicules légers 8h



Volume de trafic horaire par site - véhicules légers 11h



Volume de trafic horaire par site - véhicules légers 23h

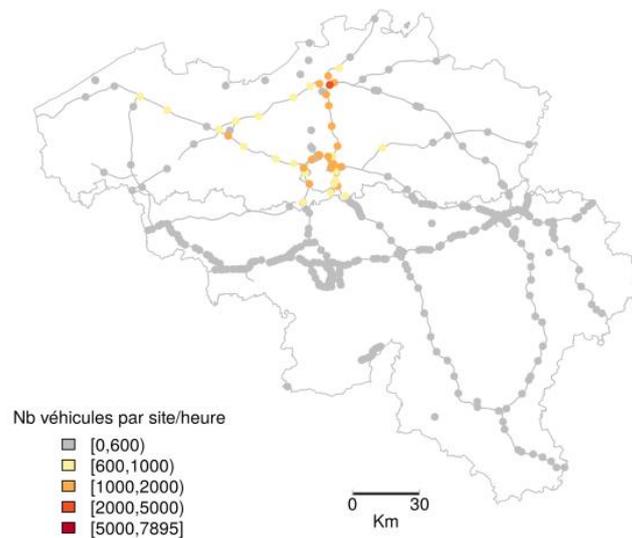


Figure 6: Trafic moyen comptabilisé par boucle de comptage (en véhicules par heure) A: durant une heure de pointe (8h du matin) ; B: durant une heure creuse (11h du matin) et C: durant la nuit (23h).

2.5 Accidentalité sur autoroute

En général, l'accidentalité n'est pas très élevée sur les autoroutes (c'est d'ailleurs le cas pour tous les pays européens ; voir Tableau 7 ; EU CARE database). Ainsi, la part d'accidents corporels sur les autoroutes est

peu élevée surtout si l'on tient compte du nombre de véhicules-km parcourus sur ce type de voirie (Tableau 7). Elle ne représente en effet que 9% des accidents corporels alors que 38% des véhicules km sont parcourus sur autoroute. Pour 2014 et 2015, un total de 158 accidents mortels sur les autoroutes a été comptabilisé. Ces accidents ont fait 182 tués, 59 blessés graves et 102 blessés légers.

Les routes provinciales et régionales enregistrent un trafic proche des autoroutes (43 %). Toutefois, la part des accidents sur ce réseau secondaire est bien plus lourde, comptabilisant 33% des accidents corporels (contre 9% sur autoroute) et jusqu'à 53% des accidents mortels (contre 15% sur autoroute). Ces chiffres sont importants car un report de trafic sur les autoroutes pourrait permettre de diminuer le nombre d'accidents graves hors agglomération.

Tableau 2: Chiffres clés concernant les accidents sur autoroute 2015

	Décédés 30 jours		Blessés		Accidents corporels		Gravité
2015							
Autoroutes	102	15 %	4.879	11 %	3.211	9 %	32
Hors agglomération	370	53 %	16.463	35 %	11.816	33 %	31
En agglomération	224	32 %	25.333	54 %	20.920	58 %	11
Inconnu	36		5.164		4.356		
Total	732	100 %	51.839	100 %	40.303	100 %	18

Source : Police fédérale/DGR/DRI/BIPOL

Pour la période 2014-2015, 15% des conducteurs impliqués roulaient à une **vitesse excessive ou inadaptée** au moment de l'accident³. Ce pourcentage est inférieur au nombre de conducteurs qui roulaient trop vite ou de façon inadaptée au cours de la période 2009-2013 (il s'agissait alors de 27 % des usagers impliqués), mais la vitesse reste un point d'attention.

2.6 Le comportement de vitesse sur les autoroutes

2.6.1 Résultats de la mesure de vitesse de l'IBSR de 2011

La dernière étude publiée par l'IBSR utilisant les données radar sur autoroute date de 2011 (Riguelle, 2011). Elle dresse le constat suivant : la vitesse moyenne sur autoroute dans des conditions où le conducteur est libre de choisir sa vitesse (« vitesse libre ») est de l'ordre de 117,9 km/h, avec une distribution de vitesse comprise globalement entre 70 et 200 km/h. Le percentile 85 (V85) est de 131 km/h ce qui signifie que 15% des véhicules légers enregistrés avaient une vitesse supérieure à cette valeur. Sur la totalité des enregistrements pour les véhicules légers en condition de vitesse libre, 40% étaient en infraction, se répartissant en 25% d'infractions de moins de 10 km/h et 15% de plus de 10 km/h.

La vitesse moyenne sur autoroute résulte d'une diversité de situations, tant temporelles que spatiales. Tout d'abord, les vitesses pratiquées sur les autoroutes à deux bandes et à trois bandes ne sont pas similaires et les vitesses moyennes enregistrées par bande non plus (Figure 7). D'après Riguelle (2011), la Flandre et la Wallonie ne présentent pas de différences significatives en termes de vitesse (Figure 7). Les régions ne semblent pas être l'élément géographique le plus pertinent pour distinguer des différences de vitesse. Par contre, certains sites (Figure 9) présentent quand même des vitesses significativement plus élevées que d'autres. La composition du trafic, en termes de quantité mais surtout de type de déplacement, semble influencer les vitesses pratiquées.

³ Il s'agit sans doute d'une sous-estimation, ce facteur étant difficile à établir a posteriori.

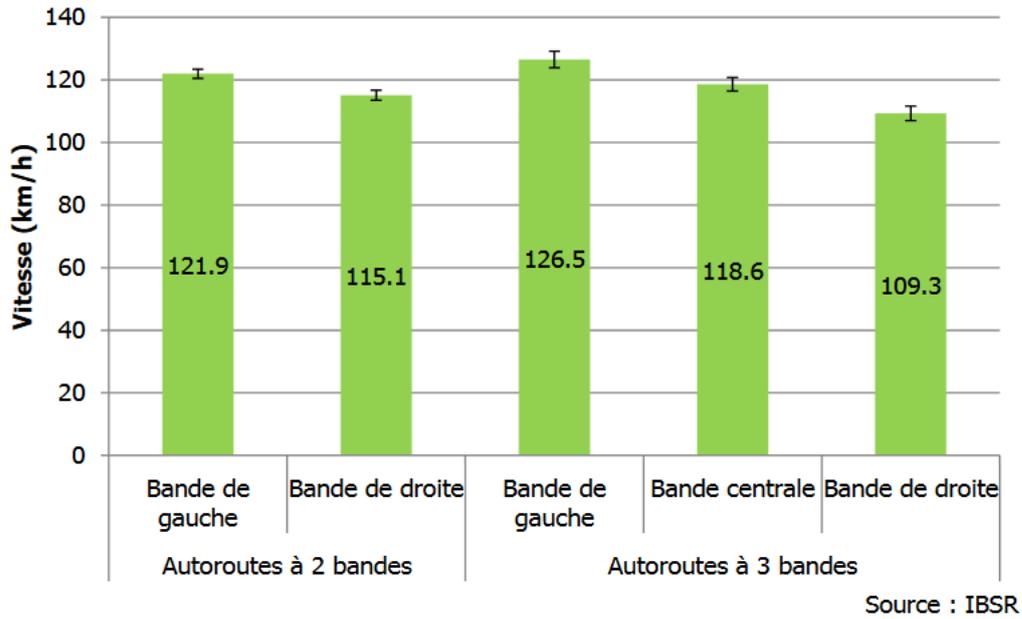


Figure 7: vitesse moyenne sur autoroute par bande de circulation en 2011 pour les véhicules légers (Riguelle, 2012)

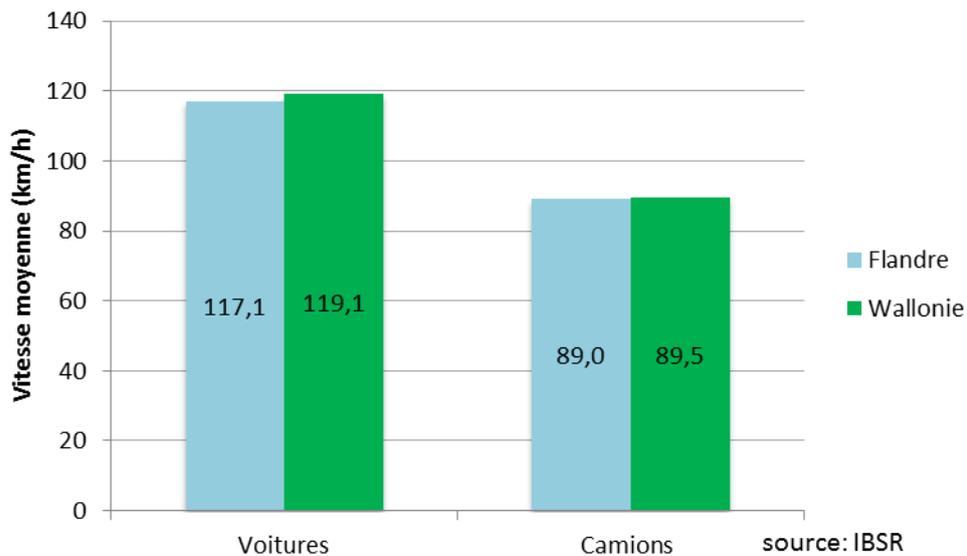
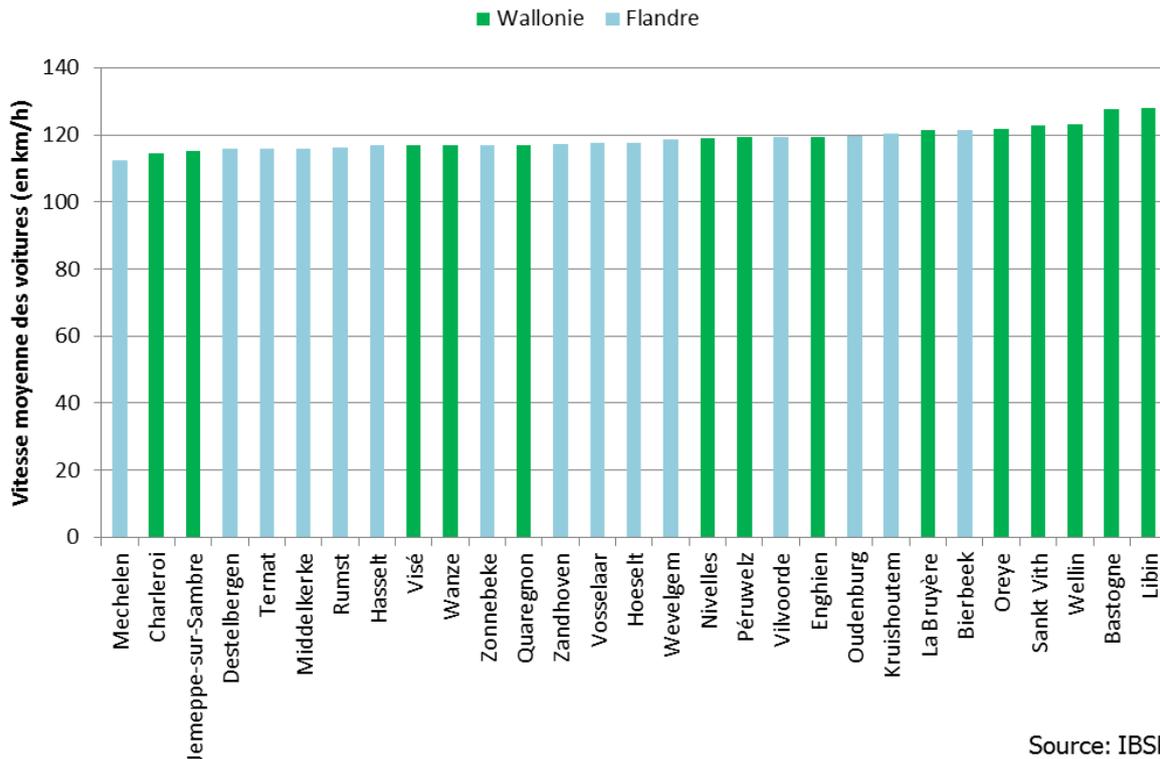


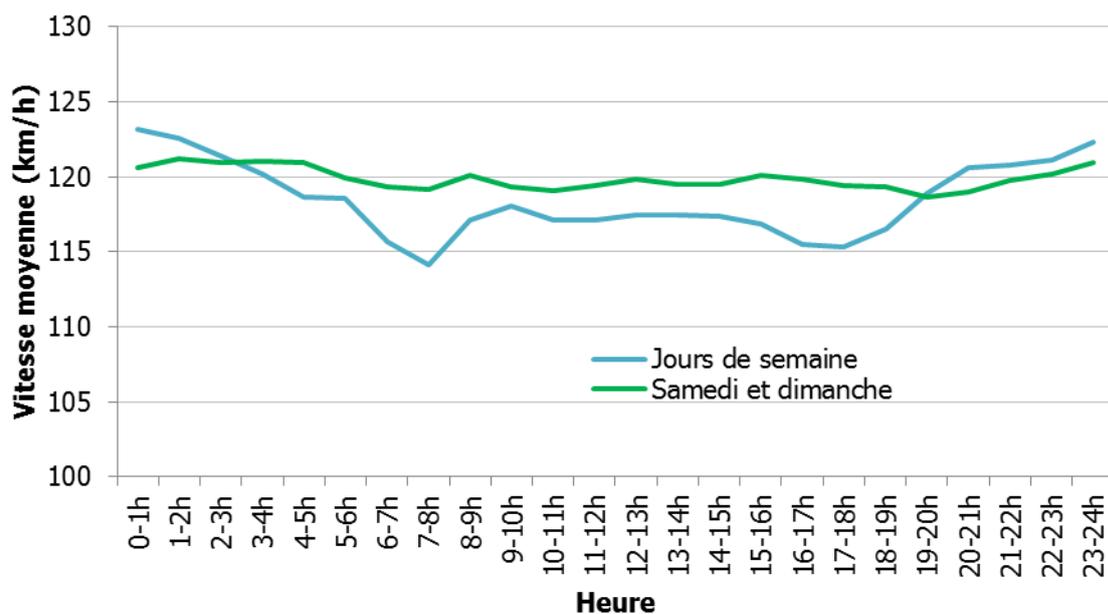
Figure 8: vitesse moyenne sur autoroute par type de véhicule et par région (Riguelle, 2012)



Source: IBSR

Figure 9: vitesse moyenne sur autoroute par site

Temporellement, les vitesses libres relevées la nuit ou le week-end sont plus élevées que pendant les jours de semaine (Figure 10). La vitesse libre moyenne est supérieure à la vitesse maximale autorisée de 120 km/h entre 22h et 4h du matin, quel que soit le jour de la semaine. Du lundi au vendredi, on observe une diminution marquée de la vitesse moyenne pendant les pointes de trafic du matin (7-8h) et du soir (16-18h).



Source : IBSF

Figure 10: vitesse moyenne horaire sur autoroute (Riguelle, 2012)

La vitesse doit également être liée à un autre comportement : le respect des distances de sécurité. Une augmentation ou diminution de la vitesse modifie la distance de sécurité minimale entre deux véhicules. Dans la mesure de vitesse 2011, il ressort que près de 41 % des conducteurs de véhicules légers ne respectaient pas les distances de sécurité.

2.6.2 Résultats de la mesure de vitesse de 2015

En 2015, les indicateurs de vitesse sur les autoroutes (Trotta, 2016) ont été calculés avec une nouvelle source de données: les floating car data (FCD). Les FCD sont des données récoltées sur base de systèmes « flottants » de mesures, c'est-à-dire des véhicules circulant dans le flux de trafic. En équipant ces véhicules de modules de localisation et de systèmes de communication reliés à un système central pouvant entrer en liaison avec les véhicules traceurs, des données sur la position et d'autres caractéristiques de ces véhicules peuvent être récoltées à intervalles rapprochés (souvent en temps réel).

Nous ne pouvons utiliser les résultats de la mesure de 2015 pour tirer des conclusions sur les comportements globaux des belges car les floating car data ne représentent que 4 à 5 % du trafic. En plus, les points de mesures n'étaient pas suffisamment représentatifs pour l'entièreté de la Belgique. Dans le dernier rapport sur la mesure de vitesse hors agglomération, Trotta (2016) met en évidence que les vitesses calculées en 2015 sont nettement supérieures à ce qui était observé en 2011 (123 km/h contre 117 km/h en 2011 pour les autoroutes) et émet l'hypothèse d'une surreprésentation des conducteurs rapides dans l'échantillon des floating car data. Une étude interne de l'IBSR a pu vérifier ce biais en comparant la distribution des vitesses provenant des FCD avec celles enregistrées par les boucles de comptage.

2.6.3 Évolution des comportements dans le cadre d'un changement de limitation

Dans le cadre de la présente étude, 1000 belges ont été interrogés lors d'une enquête en ligne sur le comportement avoué en matière de vitesse sur autoroute, ainsi que la vitesse qu'ils appliqueraient si la limitation passait de 120 à 130 km/h en supposant que les mesures de contrôles restent identiques. Les résultats sont illustrés dans le Tableau 3.

On constate que pour les vitesses actuelles de 100, 110 et 120 km/h, une grande proportion des gens interrogés augmenterait leur vitesse de 10 km/h, en accord avec la nouvelle limitation de vitesse. D'autre part, plus de 20% des gens qui ont l'habitude de rouler à une vitesse de 130 km/h, passeraient à une vitesse de 140 km/h.

Tableau 3: Changement de comportement avoué des belges en matière de vitesse si la limitation de vitesse sur autoroute passait de 120 à 130 km/h (N =1000 ; enquête en ligne en collaboration avec iVOX). Le tableau correspond à des pourcentages. Les nombres en gras noir indiquent la proportion de personnes ne changeant pas de comportement ; les nombres en rouge indiquent la proportion de personnes augmentant leur vitesse de 10km/h.

	Vitesse appliquée si la limite passait à 130 km/h										
	70km/u	80km/u	90km/u	100km/u	110km/u	120km/u	130km/u	140km/u	150km/u ou +	Total	
Vitesse actuellement appliquée (limite = 120 km/h)	70km/u	0	100 %	0	0	0	0	0	0	0	100
	80km/h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90km/u	0	0	82 %	18 %	0	0	0	0	0	100
	100km/u	0	0	1	50 %	43 %	5	0	0	0	100
	110km/u	0	0	0	0	54 %	46 %	0	0	0	100
	120km/u	0	0	0	0	0	18 %	82 %	0	0	100
	130km/u	1	0	0	0	0	0	77 %	22 %	0	100
	140km/u	0	0	0	0	0	0	13	79 %	8 %	100
	150km/u ou +	0	0	0	0	0	0	0	0	100 %	100

2.7 Synthèse

La lecture de ce chapitre montre que les infrastructures belges sont d'un bon niveau et en constante modernisation technologique. Les Régions semblent avoir la volonté d'adopter constamment les dernières technologies en matière de monitoring et de gestion du trafic. Le trafic actuel est assez intense en Belgique. En effet, en heure de pointe, le réseau est saturé en bon nombre d'endroits. Même en heures creuses, la vitesse libre n'atteint jamais 120 km/h pour plusieurs tronçons. La situation se calme encore, fort heureusement, la nuit.

Les automobilistes ont tendance à rouler vite et ne semblent pas trouver problématique de rouler 10 voire 20 km/h au-delà de la limitation. De plus, ils sous estiment les dangers de la conduite en excès de vitesse. Enfin, une proportion importante de la population accélérerait s'il y avait un passage de 120 à 130 km/h.

Il faudra donc garder cet aspect à l'esprit : une augmentation de la vitesse limite légale sur autoroute pourrait s'accompagner d'une augmentation de la vitesse moyenne.

3 ÉTATS DE L'ART: SYNTHÈSE DE LITTÉRATURE INTERNATIONALE

3.1 Introduction

L'objet principal de ce chapitre est consacré à l'étude des impacts de la vitesse et de l'homogénéité de la vitesse sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement.

La **vitesse** est une grandeur qui, lorsqu'on parle de circulation routière, est couramment associée au risque d'accident. Un nombre considérable de recherches indiquent, à ce sujet, que le risque d'accident augmente significativement avec la vitesse de déplacement des véhicules. Outre les aspects liés à la sécurité, les notions de vitesse ou de vitesse moyenne des flux de circulation sont également utilisées pour aborder certaines problématiques relatives à la mobilité mais également à l'environnement. De même, les termes de **volume de trafic** (ou débit de circulation), de **variation de vitesse** et de **vitesse optimale**, qui seront définies ci-après, sont couramment utilisés dans la littérature lorsqu'il est question d'étudier l'impact de la vitesse des véhicules sur la sécurité routière, la mobilité et l'environnement.

Avant de procéder à une étude détaillée des impacts de la vitesse et de l'homogénéité de la vitesse sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement, il convient donc de définir la terminologie habituellement utilisée dans la littérature et d'évoquer brièvement quelques principes qui y sont associés. Les systèmes relatifs aux **limites de vitesse variables** feront également l'objet d'un point d'attention étant donné le rôle innovateur qu'ils représentent dans la gestion des flux de circulation.

3.2 Principes et définitions

- Le **volume de trafic** peut être défini comme le nombre total de véhicules qui passent en un point de la route (ou d'une bande de circulation) par unité de temps (TRB, 2000). Il faut noter que, selon les auteurs, le volume de trafic est aussi exprimé en termes de « flux de trafic » (*traffic flow*) ou encore de « débit de circulation » (à ne pas confondre avec la densité de trafic qui, elle, représente le nombre de véhicules par unité de longueur de réseau routier).
- La **variation des vitesses** peut être interprétée comme étant la variation de la vitesse d'un véhicule ou d'un flux de véhicules au cours du temps ou comme étant la variation des vitesses des véhicules au sein d'un flux de trafic. Elle correspond, dans ce dernier cas, à la dispersion des moyennes de vitesse des conducteurs (Wang H. *et al.*, 2012). Outre la vitesse moyenne des véhicules, cette notion de variation des vitesses est couramment utilisée dans la littérature scientifique pour déterminer les causes d'accidents, étudier les problèmes de congestion de trafic routier (autrement dit, lorsque la vitesse d'un véhicule est imposée par le véhicule qui le précède) ou les problématiques liées à l'environnement (émissions de polluants, etc.). Il a par exemple été démontré que la variation des vitesses entre véhicules augmente la probabilité d'accident (Garber & Ehrhart, 2000). Le phénomène associé à une variation importante des vitesses dans un flux de trafic, qui mène à davantage de contiguïté entre véhicules (par rapprochement, croisement ou dépassement), a été mentionné dans plusieurs études (voir par exemple Elvik *et al.*, 2004). L'impact de la variation de la vitesse sur les phénomènes de congestion routière a aussi été mis en évidence, notamment à travers la formation des vagues successives d'arrêt et de redémarrage du trafic (*stop-and-go*). Enfin, on estime que les accélérations (ou décélérations) ont aussi un impact non négligeable sur la consommation et les taux d'émission de gaz et de particules (Johnson & Pawar, 2005). Comme nous le verrons par la suite, maintenir une allure constante sur la route permet, par exemple, de réduire la consommation moyenne des véhicules et les émissions de gaz tels que les dioxydes de carbone (CO₂) (Garcia-Castro & Monzon, 2014) et les oxydes d'azote (NO_x) (Ahn *et al.*, 2002).
- Ayant une influence significative sur la sécurité routière, la mobilité et l'environnement, la vitesse moyenne et la variation des vitesses des véhicules représentent donc des éléments-clés dans la gestion des flux de trafic. Pour chacune des problématiques avancées, la définition d'une **vitesse optimale** doit permettre de réduire les effets indésirables liés à des vitesses « inadaptées » sur la route.

La fluidité du trafic sur la route ne dépend pas uniquement du volume de trafic, mais également de la vitesse moyenne et des variations de vitesses au sein du flux de circulation. Par conséquent, la bonne gestion des flux de trafic revêt une importance primordiale, d'autant plus que, selon les estimations, la congestion du trafic coûterait chaque année à l'Union européenne entre 1% et 2% de son PIB (van Essen *et al.*, 2011). L'estimation du coût de la congestion automobile sur les autoroutes varierait de 0,11 euros/véhicule-km en zone rurale à 0,56 euros/véhicule-km sur les autoroutes urbaines (van Essen *et al.*, 2011). La Belgique n'est pas épargnée par les phénomènes de congestion: le pays comptabilise le plus grand nombre d'heures perdues dans les embouteillages parmi l'ensemble des pays européens (51 heures perdues en moyenne en 2014) (INRIX, 2015). Notons qu'en ce qui concerne le trafic autoroutier, c'est autour des villes de Bruxelles et d'Anvers que l'on observe le plus d'embouteillages, particulièrement durant les heures de pointe du matin et du soir (OCDE, 2013).

Plus généralement, en plus de la problématique liée à la congestion routière, plusieurs études ont tenté d'estimer le coût social et environnemental des nuisances induites par la circulation routière en termes monétaires ou les coûts et bénéfices induits par un changement de vitesse sur les autoroutes (voir par ex. Vanhove F., 2009). Ainsi, selon un rapport ministériel français, le coût des nuisances sonores sur autoroute s'élèverait de 0,78 €/1000 véhicules-km à 22,40 €/1000 véhicules-km (selon que l'on se situe en milieu rural ou dans un milieu urbain très dense) (Croq & Le Maître, 2013). Les coûts socio-économiques de la congestion routière et des nuisances induites par la circulation routière sont ainsi d'autant plus importants que le réseau autoroutier se situe à proximité ou à l'intérieur de zones densément peuplées. Enfin, les accidents de la route peuvent, eux aussi, représenter un coût social important. À titre d'exemple, le coût des accidents ayant eu lieu aux Pays-Bas a été estimé pour l'année 2009 à quelque 2,2% du PIB du pays (SWOV, 2014 ; coût immatériels compris).

La gestion appropriée de la vitesse des véhicules et des flux de trafic sur autoroute peut potentiellement influencer les effets indésirables liés à la circulation routière. Si la vitesse des véhicules dépend en grande partie de l'infrastructure, des conditions de trafic et du comportement des conducteurs, la définition d'une limite de vitesse maximale autorisée représente l'un des moyens communément appliqués pour contrôler la vitesse des véhicules et gérer les flux de circulation. Ces limites de vitesses autorisées peuvent être établies sur une base fixe ou varier dans le temps: on parle dans ce dernier cas de limites de vitesse variables.

3.3 Limites de vitesse variables

Les **limites de vitesse variables** (*Variable Speed Limits - VSL*) font référence aux systèmes de gestion de la vitesse maximale autorisée au cours du temps. La gestion de la vitesse peut s'effectuer soit au moyen de limites de vitesse prédéfinies, soit par l'intermédiaire de systèmes dynamiques ou d'algorithmes permettant de déterminer une limite de vitesse à partir de données de trafic collectées en temps réel, notamment en vue d'optimiser les flux de trafic. L'optimisation des flux de trafic n'est cependant pas le seul objectif recherché lors de la mise en place de tels systèmes. Outre l'amélioration de la mobilité, les systèmes de régulation dynamique de la vitesse ont également été conçus pour atténuer les pics de pollution.

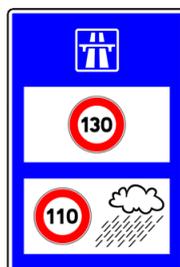


Figure 11: Exemple de panneau de signalisation de vitesse variable en France (panneau C25b)

En pratique, les limites de vitesse variables peuvent être indiquées par les panneaux de signalisation disposés le long des routes : c'est le cas, par exemple, du signal C25b (Figure 11) utilisé sur les autoroutes françaises et qui impose une limite de vitesse par beau temps et par temps de pluie. Les limites de vitesse

variables peuvent également être indiquées au moyen de **panneaux à message variable (PMV)** (*Variable Message Sign - VMS*). Officiellement introduits dans la Convention de Vienne de 1968 sur la signalisation routière par un amendement entré en vigueur le 30 novembre 1995 (CEE-ONU, 2010), les panneaux à message variable représentent un moyen efficace d'informer les usagers de la route des conditions de circulation en temps réel, de la survenue d'accidents, des conditions météorologiques ou encore des pics de pollution. Généralement situés au-dessus des voies de circulation au moyen de portiques, ils sont aussi utilisés pour communiquer les vitesses maximales autorisées. L'adaptation des limites de vitesse et leur diffusion par l'intermédiaire des PMV ont d'ailleurs été appliqués avec succès par plusieurs États membres de l'Union européenne, en particulier, sur des segments d'autoroute généralement embouteillés ou sujets à des accidents fréquents (Commission européenne, 2010).

Garcia-Castro & Monzon (2014) distinguent deux types de systèmes de régulation de la vitesse: les limitations de vitesse variables planifiées et la **régulation dynamique de vitesse (RDV)**. Les limitations de vitesse variables planifiées sont basées sur un calendrier ou un horaire préétabli, alors que la régulation dynamique de vitesse adapte la vitesse maximale autorisée en fonction de conditions de circulation en temps réel, de conditions météorologiques et/ou en fonction de la qualité de l'air (voir Figure 12).

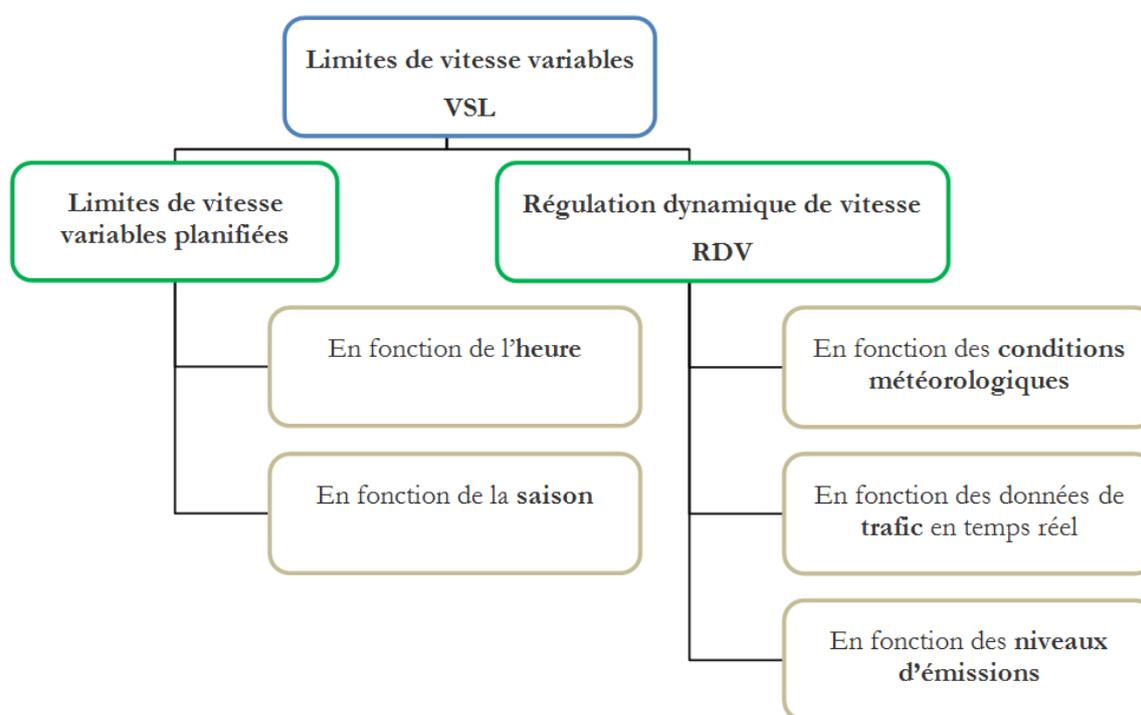


Figure 12: Classification des limites de vitesse variables (adapté de Garcia-Castro & Monzon, 2014).

Les RDV ont été mis en place en Europe sur plusieurs autoroutes (ou segments d'autoroutes) (voir chapitre 4). Les objectifs poursuivis par la mise en place des RDV ne sont cependant pas toujours les mêmes, selon que l'on souhaite améliorer la mobilité des véhicules, la sécurité des usagers ou la qualité de l'air.

La suite de ce chapitre examine l'effet de la vitesse et de l'homogénéisation de la vitesse sur la mobilité, le risque d'accident et l'environnement. L'impact de la mise en place des limites de vitesse variables sera ensuite étudié pour chacune de ces problématiques. Enfin, les avantages et inconvénients de la régulation dynamique de vitesse sur autoroute seront ensuite présentés sous forme de synthèse.

3.4 Effets de la vitesse et de l'homogénéité de la vitesse sur la mobilité

D'une part, le débit de circulation dépend de la quantité de véhicules en circulation et de la capacité du réseau routier. La demande en trafic varie en fonction du temps (par exemple, selon l'heure de la journée) et peut varier rapidement dans un intervalle de temps relativement court. Lorsque la demande de trafic se rapproche de la capacité maximale du réseau, des phénomènes de congestion commencent à apparaître. La circulation est alors ralentie voire à l'arrêt si la demande de trafic dépasse la capacité maximale du réseau. Le rapport entre le volume de trafic (V) et la capacité maximale théorique d'une bande de circulation (C) permet ainsi d'apprécier le niveau de congestion. Hartgen & Fields (2006) définissent différents niveaux de congestion, allant d'une situation favorable de libre circulation lors de laquelle les usagers de la route ne sont théoriquement pas affectés par la présence des autres usagers ($V/C \leq 0,35$) jusqu'à des conditions défavorables caractérisées par un flux de trafic instable et proche de la limite de saturation du réseau ($0,90 \leq V/C \leq 1$). Une demande de trafic excédant la capacité de la voie ou de la bande de circulation ($V/C > 1$) peut alors être facilement atteinte suite à une simple perturbation dans le flux de circulation (telle que la présence d'un accident) (Hartgen & Fields, 2006). Le flux de trafic peut alors faire face à des vagues successives d'arrêt et de redémarrage du trafic, ce phénomène est aussi connu sous le nom de « stop-and-go ».

D'autre part, la fluidité du trafic est également conditionnée par la vitesse moyenne du flux de circulation. Plusieurs études (voir par ex. U.S. Department of Transportation (2006), Akin *et al.* (2011)) ont mis la vitesse en équation avec le flux de circulation sur base de méthodes expérimentales. La relation entre vitesse moyenne et flux de trafic (nombre de véhicules par heure) peut être exprimée sous forme d'un diagramme fondamental⁴ (voir Papageorgiou *et al.*, 2008). Ce diagramme fondamental, illustré par Beneš & Příbyl (2014) (Figure 13), permet entre autres l'identification de conditions de trafic stables et l'identification de conditions de trafic instables (lors desquelles le trafic subit des ralentissements).

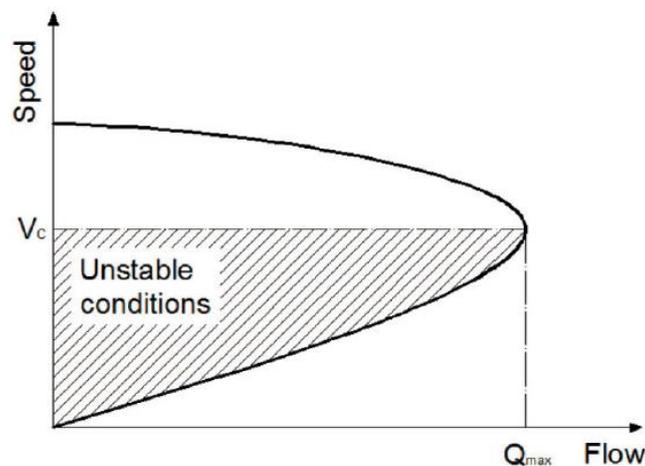


Figure 13: Relation entre vitesse et flux de trafic (avec V_c = vitesse critique et Q_{max} = débit maximum de trafic) et définition de la zone d'instabilité des conditions de circulation (d'après Beneš & Příbyl, 2014).

La courbe illustrée en Figure 13 exprime la relation qui existe entre le flux de trafic et la vitesse de circulation (dans l'hypothèse où les conditions de trafic ne changent pas fondamentalement dans l'espace et dans le temps). Pour mieux comprendre la relation qui existe entre la vitesse (V) et le flux de trafic (Q), partons du point situé en haut de la courbe, où le débit de circulation (Q) est proche de 0. Dans ce cas

⁴ Les relations vitesse-flux, vitesse-densité et flux-densité font partie des diagrammes fondamentaux généralement utilisés dans l'étude des flux de trafic.

précis, les conditions de circulation sont stables. Le trafic est peu dense et les véhicules adaptent librement leur vitesse (en fonction des limitations de vitesse). La vitesse du trafic est alors maximale ($V = V_{\max}$). À mesure que le volume de trafic augmente, la vitesse des véhicules est de plus en plus conditionnée par la présence des autres véhicules présents sur la route. Pour une certaine densité de trafic et une certaine vitesse de circulation (V_c), le débit de circulation atteint une valeur maximale ($Q = Q_{\max}$). Les véhicules circulent alors à une certaine vitesse (V_c) en-deçà de laquelle les conditions de circulation sont dites « instables » car le volume de trafic est trop important et la plupart des véhicules sont contraints d'adapter leur vitesse à la vitesse du trafic. Le débit de trafic (Q) commence alors à diminuer jusqu'à atteindre une valeur proche de 0. Le réseau est alors saturé (point à l'origine).

Cette relation montre que pour un débit de circulation donné (Q), deux vitesses de circulation sont possibles selon les conditions de circulation. Notons que l'optimisation du débit de trafic (Q_{\max}) n'est atteinte que pour une seule vitesse de circulation donnée (V_c). La vitesse critique (V_c) sur autoroute dépend de nombreux paramètres comme le nombre de bandes de circulation, la vitesse maximale autorisée ou les conditions météorologiques. Notons enfin que le débit maximum de trafic (Q_{\max}) dépend de la capacité du réseau routier à absorber un certain volume de trafic. Étendre la capacité du réseau peut donc contribuer à améliorer les conditions de circulation. Les conditions de mobilité sont toutefois également conditionnées par la limite de vitesse maximale autorisée.

Dans une étude de cas menée au Royaume-Uni, Heydecker (2011) indique, à ce propos, que les effets bénéfiques d'une augmentation de la limite de vitesse sur autoroute de 70 mph (soit environ 113 km/h) à 80 mph (soit près de 130 km/h) ne seraient perçus, en termes de temps de parcours, que lorsque le trafic est peu dense et que le flux de circulation est faible. Ceci peut être expliqué par le fait qu'en dehors de ces conditions de circulation particulières, la vitesse des véhicules n'est plus conditionnée par la limite de vitesse autorisée mais par les conditions de trafic. Ce principe est illustré en Figure 14. Sur base de la relation entre vitesse et flux de trafic telle que décrite par le diagramme fondamental, la Figure 14 montre quel serait l'effet d'une augmentation de la limite de vitesse maximale autorisée (courbe rouge) et quel serait l'effet attendu d'une augmentation de la capacité de réseau (courbe verte).

Il apparaît que les effets bénéfiques d'une augmentation des limites de vitesse sont très limités et n'ont aucun impact lorsque le flux de trafic est important. En revanche, si l'on parvient à augmenter la vitesse à capacité maximale du réseau, cela permet non seulement d'améliorer légèrement la vitesse des véhicules en cas de trafic dense, mais également de réduire partiellement les phénomènes de congestion.

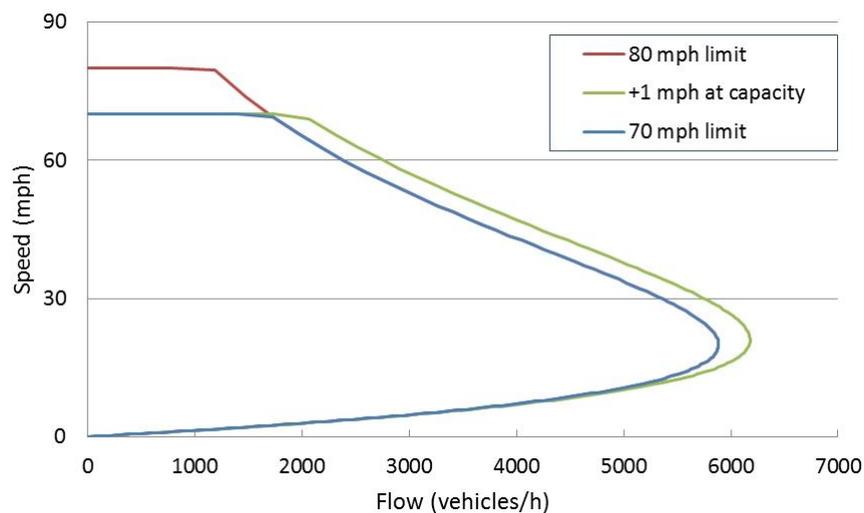


Figure 14: Relation entre vitesse et flux de trafic (dans le cas d'une autoroute dont la limite de vitesse est fixée à 70 mph) et effets attendus d'une augmentation de la limitation de vitesse et d'une augmentation de la capacité du réseau (Heydecker, 2011).

Heydecker (2011) déplore ainsi le fait qu'une augmentation de la vitesse maximale autorisée ne puisse régler les problèmes de congestion ou améliorer les temps de parcours en dehors de conditions de trafic particulières (c'est-à-dire lorsque la densité de trafic est faible), tandis qu'elle augmente le risque d'accident⁵.

Étendre la capacité du réseau peut donc contribuer à améliorer les conditions de circulation. À noter toutefois que la demande de circulation, susceptible de s'adapter à une capacité de réseau étendue peut, à terme, atténuer les effets positifs d'une telle mesure (Maerivoet S. & Yperman I., 2008). À défaut de recourir aux chantiers de construction, l'utilisation de données relatives aux conditions de circulation en temps réel et la mise en place d'une régulation dynamique des vitesses peuvent contribuer à augmenter la capacité du réseau autoroutier (OCDE, 2010). Notons qu'à l'inverse, de mauvaises conditions météorologiques contribueront à réduire cette capacité (voir Chin S.M. *et al.*, 2004).

En réalité, l'un des rôles de la régulation dynamique des vitesses est de réduire les écarts de vitesse des véhicules dans un flux de trafic. Ainsi, la mesure consistant à limiter le nombre de véhicules roulant à des vitesses excessives permet, par exemple, de réduire cette variabilité des vitesses dans le trafic. Notons que cette variabilité des vitesses pratiquées dépend de nombreux facteurs tels que les conditions météorologiques ou le pourcentage de camions présents dans le trafic (Johnson & Pawar, 2005).

La relation entre variabilité des vitesses (ou écart-type des vitesses) et vitesse moyenne des flux de circulation est relativement complexe. Golob *et al.* (2004) définissent le long de la courbe du diagramme fondamental (cf. Figure 13) différents régimes de trafic pour chacun desquels la variabilité des vitesses a été mesurée. Ils mettent ainsi en évidence que cette variabilité des vitesses apparaît particulièrement importante dans les conditions de circulation instables (à l'exception du degré de congestion le plus avancé où le trafic est quasiment à l'arrêt). Par ailleurs, dans leur étude sur la vitesse des véhicules sur autoroute, Shankar & Mannering (1998) démontrent que la variabilité des vitesses sur une bande de circulation est en réalité affectée, d'une part, par la variabilité des vitesses sur les bandes de circulation adjacentes et, d'autre part, par les vitesses moyennes enregistrées sur la bande de circulation concernée et sur les autres bandes de circulation.

La complexité des liens qui existent entre harmonisation des vitesses dans un flux de circulation, densité de trafic et phénomènes de congestion a été particulièrement bien illustrée par Sugiyama *et al.* (2008) qui ont observé, dans un flux de véhicules en circulation libre sur une route circulaire, le passage d'un état d'équilibre où tous les véhicules circulent à la même vitesse à une instabilité de mouvement de ces véhicules et à l'émergence d'encombres en l'absence même de tout obstacle. Ce constat souligne l'importance d'une harmonisation des vitesses sur la route qui peut être favorisée par la mise en place d'une régulation dynamique des vitesses.

Outre l'augmentation de la capacité du réseau, la régulation dynamique des vitesses est capable de réduire les temps de parcours, la congestion et la longueur des files, mais également les changements de bande. Les effets bénéfiques de la mise en place de limites de vitesse variables seront décrits d'un point de vue quantitatif au paragraphe 1.7.

3.5 Effets de la vitesse et de l'homogénéité de la vitesse sur la sécurité routière

3.5.1 Effets de la vitesse

Le risque d'accident augmente significativement avec la vitesse de déplacement des véhicules (Aarts & van Schagen, 2006). La vitesse influence non seulement le risque d'accident mais également son taux de gravité. Sur les autoroutes, la vitesse excessive ou inadaptée représente d'ailleurs l'une des principales causes des accidents mortels (Slootmans & De Schrijver, 2015). À l'échelle européenne, bien que les autoroutes soient les routes les plus sûres en termes de conception et de réglementation, près de 27.500 personnes y ont perdu la vie ces dix dernières années, ce qui représente environ 7% des tués de la route

⁵ Notons que la relation entre sécurité routière et congestion autoroutière a fait l'objet de plusieurs études dans la littérature, voir à ce sujet Marchesini & Weijermars (2010).

(ETSC, 2015). Si la vitesse représente la principale cause d'accident, elle constitue également l'un des principaux facteurs d'aggravation des accidents de la route.

La relation entre la vitesse et le risque d'accident a été mise en évidence par un grand nombre d'études expérimentales. Les études concluent, pour la grande majorité, à l'existence d'une relation claire entre l'augmentation de la vitesse et l'augmentation du nombre et de la gravité des accidents. Une importante revue de littérature entreprise par Elvik (2005) a, par ailleurs, permis de confirmer l'existence d'un lien causal entre vitesse et risque d'accident.

Le modèle de référence communément utilisé pour mettre ce lien en équation est le « Power Model » de Nilsson. Le modèle décrit la relation entre un changement de la vitesse moyenne du trafic et un changement du nombre d'accidents et de victimes de la route (Elvik, 2009). Celui-ci peut être résumé comme suit: une augmentation de 1% de la vitesse moyenne du trafic induit une augmentation de 2% des accidents corporels, de 3% des accidents graves et de 4% des accidents mortels (Elvik *et al.*, 2004). Il s'agit d'un modèle empirique qui a été testé et dont la validité se vérifie surtout pour ce qui concerne les accidents sur voies rapides, en particulier sur les autoroutes (Cameron & Elvik, 2010). Le Tableau 4 permet d'illustrer ce principe en fonction de différentes vitesses en prenant l'exemple d'une augmentation de la vitesse moyenne de 1 km/h.

Tableau 4: Effet d'une augmentation de la vitesse moyenne de 1 km/h sur l'incidence des accidents selon le modèle de Nilsson (Power Model).

Vitesse de référence :	50 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h	100 km/h	120 km/h
Accidents avec blessés	4,0 %	2,9 %	2,5 %	2,2 %	2,0 %	1,7 %
Accidents avec tués et blessés	6,1 %	4,3 %	3,8 %	3,4 %	3,0 %	2,5 %
Accidents mortels	8,2 %	5,9 %	5,1 %	4,5 %	4,1 %	3,3 %

Source : Aarts & van Schagen, 2006

Selon le Tableau 4, l'effet d'une augmentation de la vitesse moyenne de 1 km/h a donc moins d'impact sur la gravité des accidents lorsque l'on circule sur voie rapide que lorsque l'on circule sur des routes à 50 km/h. Passer d'une vitesse moyenne de 120 km/h à une vitesse moyenne de 121 km/h sur autoroute induit toutefois une augmentation de plus de 3% du nombre d'accidents mortels. Ce pourcentage s'élève à 18% pour une vitesse augmentée de 5 km/h.

Par l'intermédiaire du Power Model, il est donc possible d'estimer l'effet d'une augmentation ou de réduction de la vitesse de trafic sur autoroute en termes de différence du risque d'accident, de blessure et de décès, en supposant que tous les autres facteurs restent constant (caractéristiques de la route, trafic, météo, etc.). Ainsi, par exemple, le déplacement du trafic à une vitesse moyenne de 130 km/h par rapport à une vitesse de 120 km/h augmente le risque d'accidents corporels légers de 9%, le risque d'accidents corporels graves de 23%, le risque d'accidents mortels de 38% et le risque de décès de 44%. Ceci est illustré dans le graphique en Figure 15 qui met en relation l'impact d'une variation de vitesse du trafic sur le risque d'accident, de blessure et de décès par rapport à une vitesse de référence de 120 km/h.

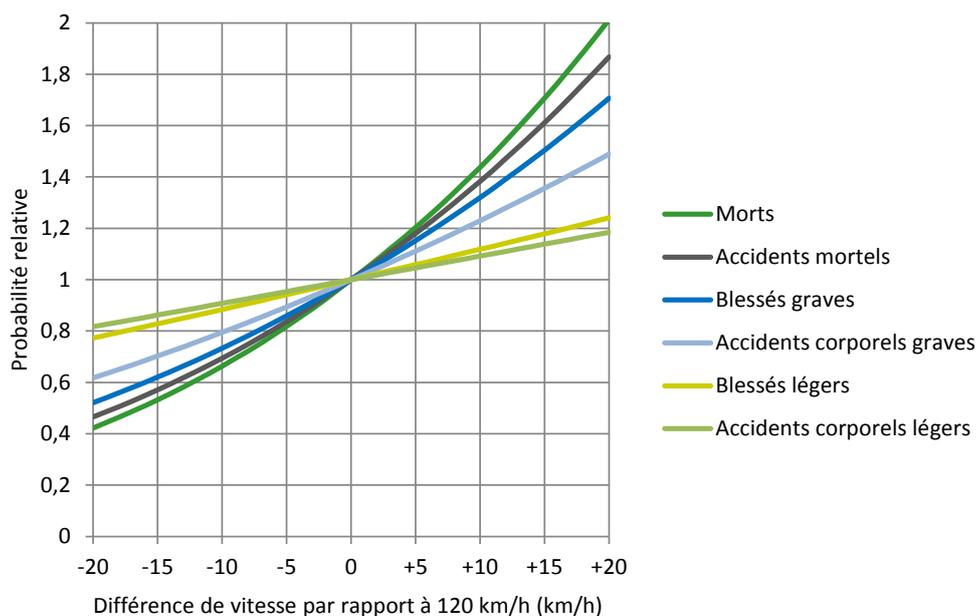


Figure 15: Variation de la probabilité d'accident, de blessure et de décès par rapport à une conduite à 120 km/h (calculée selon le Power Model).

La question de la survenue d'un accident ou de sa gravité n'est généralement pas uniquement liée à la vitesse des véhicules, mais cette dernière représente l'une des principales causes d'accident ou constitue au moins un facteur aggravant. Les raisons évoquées sont multiples. En effet, une augmentation de la vitesse implique une réduction de l'angle de vision d'une part et une augmentation de la distance d'arrêt d'autre part. Par ailleurs, en cas d'accident, plus la vitesse est grande, plus la collision sera violente et la gravité de l'accident sera importante. Plusieurs études ont permis de mettre la vitesse en relation avec l'angle de vision et avec la distance d'arrêt. Ainsi, par exemple, si l'angle de vision du conducteur est maximal à l'arrêt, celui-ci diminue avec la vitesse de déplacement: il est de 75° à une vitesse de 70 km/h, de 45° à 100 km/h et de 30° à 130 km/h (DSCR, 2007).

La distance d'arrêt d'un véhicule est également fonction de la vitesse du véhicule. Elle est déterminée d'une part par le temps de réaction nécessaire au conducteur pour commencer à freiner et, d'autre part, par la distance de freinage. Elle dépend également de facteurs tels que les caractéristiques de la route, l'attention du conducteur ou encore la qualité et l'usure des pneus (Dabin *et al.*, 2013). Plusieurs études ont permis de mettre ces distances en équation. Dans leur étude sur les caractéristiques géométriques des routes, Vertet & Gausserand (2006) utilisent, pour le calcul de la distance d'arrêt des véhicules, la formule empirique suivante: distance d'arrêt = distance de réaction + distance de freinage, où la distance de freinage est fonction de la vitesse, de l'accélération de la pesanteur et d'un coefficient de frottement longitudinal de la route (aussi appelé coefficient d'adhérence). La Figure 16 présente, selon cette formule et dans l'hypothèse où le temps de réaction est égal à 1 seconde, la relation existante entre vitesse et distance d'arrêt selon différentes catégories de revêtements.

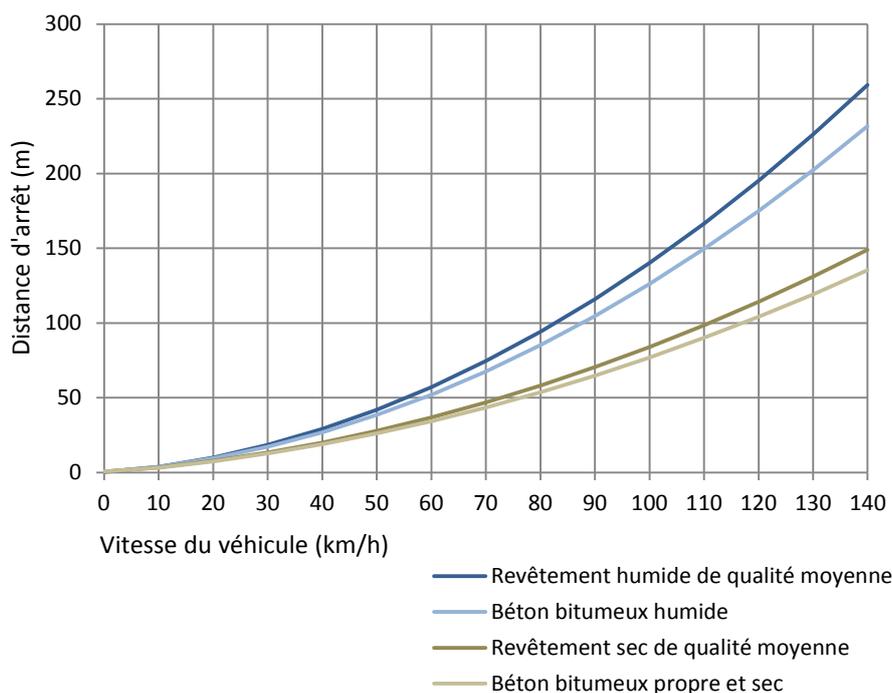


Figure 16: Distance d'arrêt en fonction de la vitesse pour différentes catégories de surfaces, en considérant un temps de réaction d'une seconde (adapté de Vertet & Gausserand, 2006).

La relation entre vitesse et distance d'arrêt indique donc, par exemple, que passer d'une vitesse de 120 km/h à 130 km/h augmente la distance d'arrêt d'un véhicule d'environ 16 m sur une surface sèche et d'environ 30 m sur une surface humide. Sur autoroute, la distance nécessaire pour s'arrêter est ainsi de l'ordre de 50% plus importante lorsque la route est humide. Indépendamment d'une visibilité restreinte pouvant augmenter le risque d'accident par temps de pluie (SWOV, 2012), cette constatation peut donc au moins partiellement justifier une adaptation de la vitesse en fonction des conditions météorologiques.

Qu'en est-il de la gravité des accidents en cas de collision ? Comme évoqué précédemment, plus la vitesse est grande, plus le choc et la gravité de l'accident sont potentiellement importants. Des études récentes telles que U.S. Department of Transportation (2005), Rosén & Sander (2009) ou Richards (2010) utilisent des fonctions logistiques pour décrire la relation qui existe entre vitesse d'impact et gravité des accidents. Les fonctions logistiques, dont la courbe représentative a la forme d'un « S », sont particulièrement adaptées pour décrire cette relation entre vitesse d'impact (par opposition à la vitesse du trafic) et gravité des accidents (Elvik, 2009).

La Figure 17 représente, selon des fonctions logistiques, la probabilité de blessure par niveau de gravité en fonction de la vitesse d'impact du véhicule de plus de 100 km/h (sommets de courbes en « S »). Le niveau de gravité des blessures peut être défini par l'échelle AIS (*Abbreviated Injury Scale*) qui comprend 6 niveaux de gravité allant des blessures légères (niveau 1) aux blessures mortelles (niveau 6). Le score MAIS (*Maximum Abbreviated Injury Scale*) traduit le score AIS maximal d'une victime souffrant d'une ou de plusieurs blessures. La catégorie MAIS 3+ regroupe tous les blessés dont le score MAIS est d'au moins 3. Les niveaux MAIS 3, 4 et 5 représentés en Figure 17 correspondent respectivement à des blessures qualifiées de sérieuses, sévères et critiques (Nuyttens & Van Belleghem, 2014).

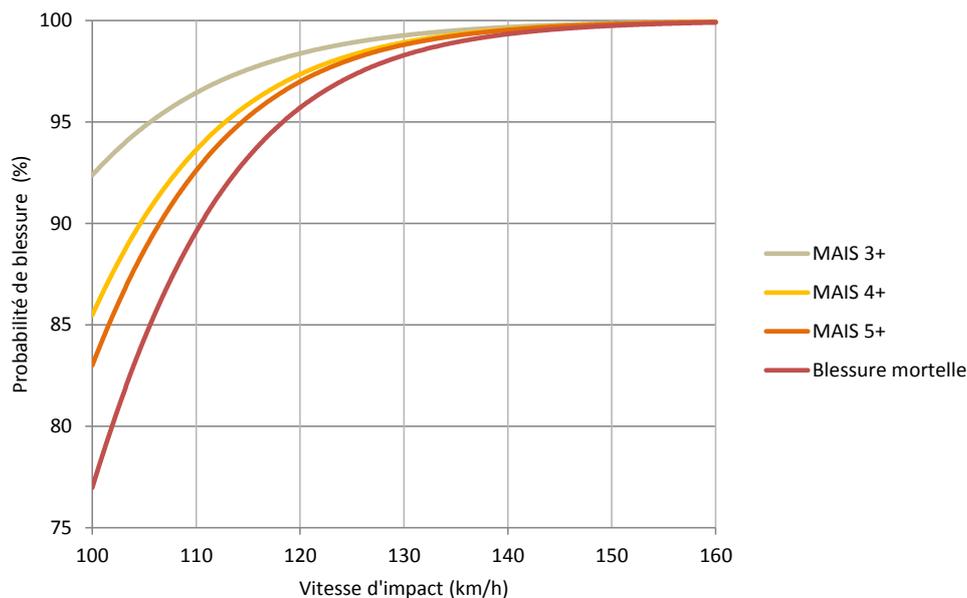


Figure 17: Probabilité de blessure par niveau de gravité en fonction de la vitesse d'impact (adapté d'U.S. Department of Transportation, 2005).

En observant la Figure 17, on peut noter qu'une vitesse d'impact de 110 km/h induit une probabilité de décès de 90%. Cette probabilité s'élève à 96% pour une vitesse d'impact de 120 km/h et s'approche de 100% pour des vitesses supérieures à 130 km/h.

Quel impact d'un changement de la vitesse maximale autorisée sur la sécurité des usagers ? L'effet d'une augmentation de la vitesse maximale autorisée se traduit en général par une augmentation de la vitesse moyenne des véhicules. Inversement, une réduction de la vitesse maximale autorisée se traduira par une réduction de la vitesse moyenne des véhicules. En réalité, la vitesse moyenne pratiquée sur autoroute ne dépend pas uniquement des limitations de vitesse mais également d'autres facteurs parmi lesquels les conditions météorologiques, les contrôles de vitesses et le débit de circulation. Rappelons que ce dernier facteur détermine la possibilité d'une conduite dite en vitesse « libre » ou influencée par les conditions de circulation. Cette relation entre vitesse moyenne et flux de trafic a d'ailleurs largement été étudiée dans la littérature scientifique (voir par ex. Papageorgiou *et al.* (2008), Duret (2014)).

L'une des principales caractéristiques inhérentes aux flux de trafic concerne l'homogénéité (ou l'hétérogénéité) des vitesses des véhicules. Pour un certain volume de trafic et en fonction des vitesses pratiquées, un flux de trafic peut passer d'un état stable à un état instable, ce qui peut altérer la fluidité du trafic et engendrer des ralentissements voire augmenter le risque d'accident.

3.5.2 Effets de la variabilité des vitesses

De nombreuses études avancent l'idée selon laquelle le nombre d'accidents de la route est davantage lié à la variabilité des vitesses dans le flux de trafic qu'au niveau de vitesse lui-même (cf. Baruya A. (1997), Kloeden *et al.* (1997) et Elvik *et al.*, (2004)). Solomon (1964), Munden (1967) et Cirillo (1968) ont, parmi les premiers, décrit ce phénomène en mettant en relation la déviation des vitesses par rapport à une vitesse moyenne dans un flux de trafic (c'est-à-dire l'écart-type des vitesses) et le taux d'accident. Ils ont ainsi obtenu une courbe en « U » qui indiquent que plus les vitesses s'écartent de la vitesse moyenne des véhicules, plus le risque d'accident est élevé. Ce phénomène, décrit plus récemment par Elvik (2009), peut être expliqué simplement selon la formulation suivante: dans l'hypothèse où des véhicules circuleraient dans la même direction à des vitesses identiques sur une voie à plusieurs bandes de circulation, aucune collision ne peut se produire (pour autant que l'on exclue les véhicules circulant en sens opposé). Seule

une variation des vitesses entre véhicules est susceptible d'engendrer une certaine contigüité entre véhicules et d'augmenter les risques de collision.

Dans leur étude sur l'effet de la vitesse et des flux de trafic sur le taux d'accidents sur les autoroutes en Virginie (USA), Garber & Ehrhart (2000) comparent plusieurs modèles mathématiques capables de mettre le taux d'accidents en équation avec plusieurs paramètres, dont la variabilité des vitesses sur autoroute. Sur base de rapports d'accidents et de données de vitesses (vitesses moyennes, écarts-types des vitesses et flux de trafic), le modèle de régression multivariée est le modèle privilégié pour décrire les effets combinés des variations de vitesses et des flux de trafic sur le taux d'accidents. La Figure 18 présente, selon un modèle de régression multivariée, la relation entre le taux d'accidents et la vitesse moyenne pratiquée sur une route limitée à 105 km/h, avec un écart-type des vitesses (σ) de 9,5 km/h et un flux de trafic (φ) de 790 véhicules par heure.

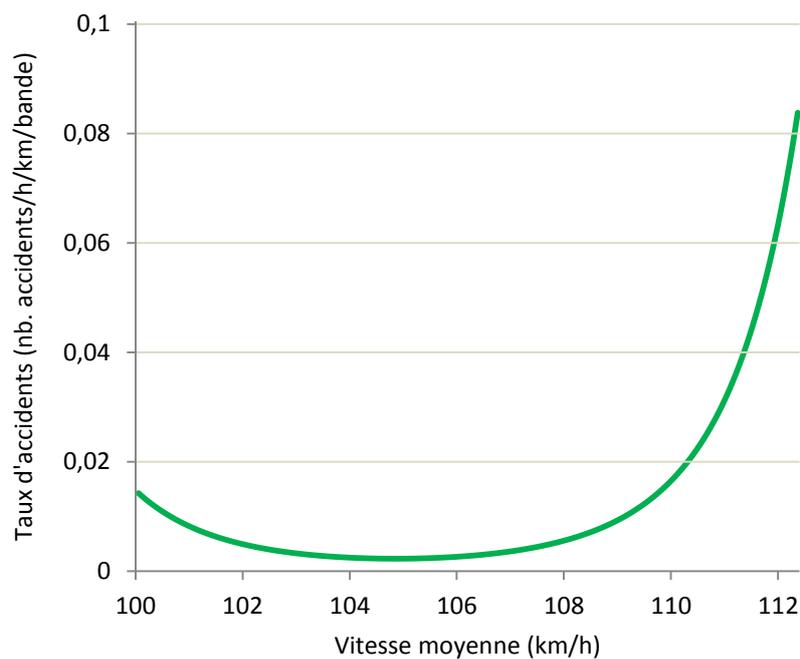


Figure 18: Taux d'accidents en fonction de la vitesse moyenne pratiquée sur une route limitée à 105 km/h (pour $\sigma = 9,5$ km/h et $\varphi = 790$ v/h) (adapté de Garber & Ehrhart, 2000).

La courbe en Figure 18 (courbe en forme de « U ») indique que le taux d'accidents diminue d'abord légèrement lorsque la vitesse moyenne augmente. Le taux d'accidents stagne ensuite lorsque la vitesse moyenne atteint une valeur proche de celle de la limite de vitesse, et augmente à nouveau pour les vitesses supérieures. Selon le modèle⁶, Garber & Ehrhart (2000) montrent qu'à flux de trafic égal ($\varphi = 790$ v/h), plus la variabilité des vitesses (σ) est importante, plus le taux d'accidents augmentera lorsque l'on s'écarte vers des vitesses supérieures à la limite de vitesse autorisée (105 km/h). A contrario, moins grande est la variabilité des vitesses dans le trafic, moins vite ce taux d'accidents augmentera.

La relation entre vitesse des véhicules et taux d'accidents telle que présentée en Figure 18 s'applique dans le cas précis d'une autoroute limitée à 105 km/h et pour une variabilité de vitesses et un débit de trafic bien définis. Cette relation est définie sur base de ces différents paramètres et peut donc plus ou moins

⁶ Garber & Ehrhart (2000) indiquent que le taux d'accidents n'est pas seulement dépendant de chacune des variables indépendantes, mais bien d'une interaction complexe entre variables indépendantes. Le modèle nécessite la prise en compte de ces différentes variables, en comparaison avec d'autres modèles construits sur base d'un seul paramètre de vitesse, tel que le modèle de Nilsson.

varier d'une autoroute à l'autre (notons qu'en Europe comme aux États-Unis, les limites de vitesses sur autoroute sont parfois différentes d'un État à l'autre et adaptées pour certaines catégories de véhicules).

Cette relation montre donc qu'en plus de la vitesse moyenne pratiquée, le niveau d'homogénéité (ou d'hétérogénéité) des vitesses dans un flux de trafic a une importance non négligeable sur les taux d'accidents. L'homogénéisation des vitesses des véhicules sur autoroute permet en effet d'améliorer le niveau de sécurité des usagers.

3.6 Effets de la vitesse et de l'homogénéité de la vitesse sur l'environnement

3.6.1 Introduction

Les impacts de la circulation automobile sur l'environnement sont multiples. La circulation des véhicules engendre une pollution atmosphérique importante (par exemple, via les émissions de monoxyde de carbone, d'oxydes d'azote ou de particules fines), elle est également émettrice de gaz à effet de serre (CO_2) et représente une source de pollution sonore importante.

La vitesse des véhicules fait partie des facteurs qui peuvent influencer les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques. La pollution sonore engendrée par la circulation dépend également de la vitesse des véhicules sur la route. Les points suivants tentent de décrire l'impact de la vitesse des véhicules sur les différentes sources de pollution.

3.6.2 Impact de la vitesse sur l'émission de CO_2 et de polluants atmosphériques

Les vitesses moyennes pratiquées et les variations de vitesse des véhicules sont deux facteurs susceptibles d'influencer la consommation de carburant et, de ce fait, les émissions de gaz à effet de serre et de particules polluantes. La question des émissions de gaz à effet de serre et de particules polluantes représente une source de préoccupation importante. En effet, le transport routier est responsable d'environ 10% de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre dans le monde (GIEC, 2014). Par ailleurs, les polluants tels que les matières particulaires, le monoxyde de carbone et le dioxyde d'azote font partie des polluants les plus nocifs pour la santé (OMS, 2016).

Sur base de modèles mathématiques, Ahn *et al.* (2002) ont étudié la consommation et les taux d'émission des véhicules en fonction de la vitesse et de l'accélération. Indépendamment des variables susceptibles d'influencer les taux d'émissions des véhicules (taille du moteur, pot catalytique, air conditionné, etc.), c'est-à-dire en considérant un véhicule-type, le modèle développé par Ahn *et al.* (2002) montre que les taux d'émissions d'hydrocarbures (HC) et des monoxydes de carbones (CO) augmentent avec la vitesse. De plus, pour une vitesse de véhicule donnée, ces taux d'émissions de HC et de CO sont d'autant plus importants que l'accélération (a) des véhicules est importante (voir Figure 19). De telles corrélations sont d'ailleurs également constatées pour ce qui concerne les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) qui augmentent rapidement avec l'accélération (Rakha *et al.*, 2000).

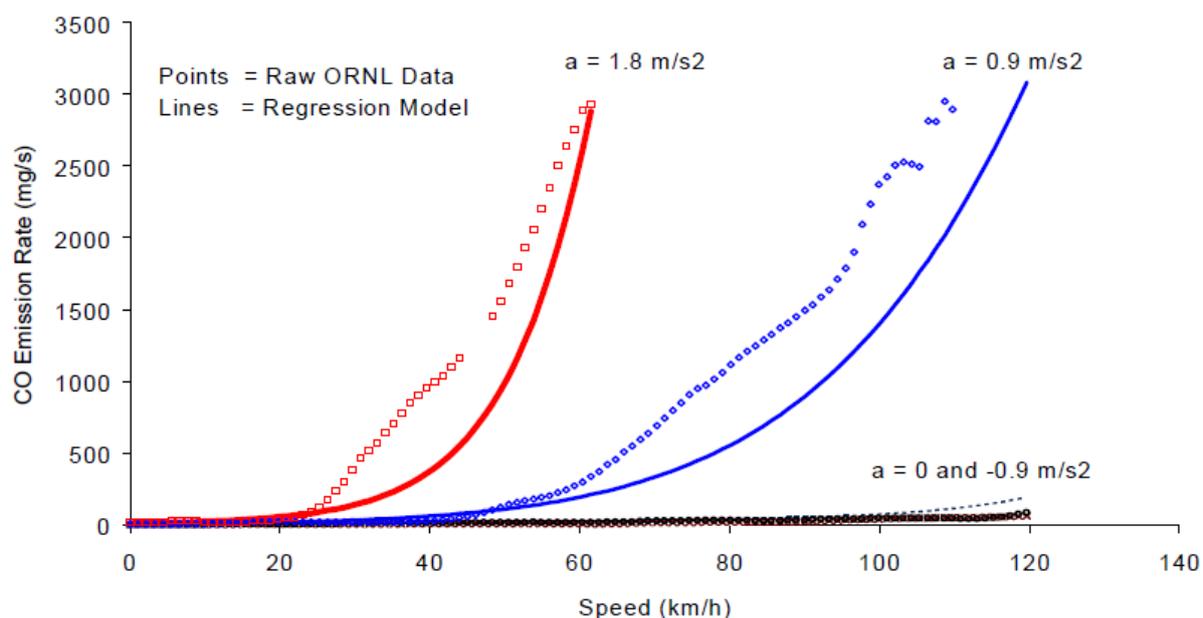


Figure 19: Courbe de régression des émissions de monoxyde de carbone (CO) en fonction de la vitesse (km/h) et de l'accélération d'un véhicule (m/s^2) (d'après Rakha *et al.*, 2000).

Notons que le monoxyde de carbone (CO) représente le polluant toxique le plus abondant dans les gaz d'échappement des véhicules automobiles (Ruidavets & Ferrières, 2007). La Figure 19 indique qu'à vitesse constante ($a=0$), le taux d'émission de CO augmente de manière relativement linéaire avec la vitesse. À une vitesse de 120 km/h, ce taux atteint une valeur proche de 200 mg/s. Si l'on regarde les différentes courbes d'émission, on peut constater qu'une conduite à vitesse constante émet une quantité de CO largement inférieure par rapport à une conduite à vitesse irrégulière.

Les émissions de dioxydes de carbone (CO_2) qui, contrairement aux monoxydes de carbone, sont des éléments naturellement présents dans l'atmosphère, représentent une source de préoccupation importante étant donné leur contribution au réchauffement climatique. Le CO_2 est généré par les moteurs des véhicules pourvus d'un catalyseur: il provient de la transformation des éléments nocifs tels le NO et le CO émis par la combustion incomplète des carburants. La quantité de CO_2 émise dans l'atmosphère est directement liée à la consommation de carburant (Woensel & de Kok, 2012).

Sur base du modèle mettant en relation accélération et émission de polluants atmosphériques (cf. Figure 19), on a pu constater que l'émission des polluants dépend assez peu de la vitesse en comparaison avec l'effet produit par l'accélération. Ainsi, plus que la vitesse moyenne pratiquée, une conduite caractérisée par des ralentissements et accélérations successives renforcera l'émission de polluants. Ce type de conduite par déplacements en stop-and-go est typiquement rencontré dans le cas des routes congestionnées. Autrement dit, à l'échelle de l'ensemble du trafic routier, la relation entre vitesse et émission de polluants dépendra des vitesses moyennes pratiquées mais surtout des accélérations et décélérations successives.

Par l'intermédiaire de modèles de prévision d'émissions de CO_2 construits sur base de conditions réelles de circulation, Barth & Boriboonsomsin (2008) ont calculé la quantité de CO_2 produite par unité de distance en fonction de la vitesse moyenne du trafic (en prenant le cas des autoroutes du sud de la Californie, USA). Cette relation entre quantité de dioxyde de carbone émise et vitesse moyenne des véhicules est représentée en Figure 20.

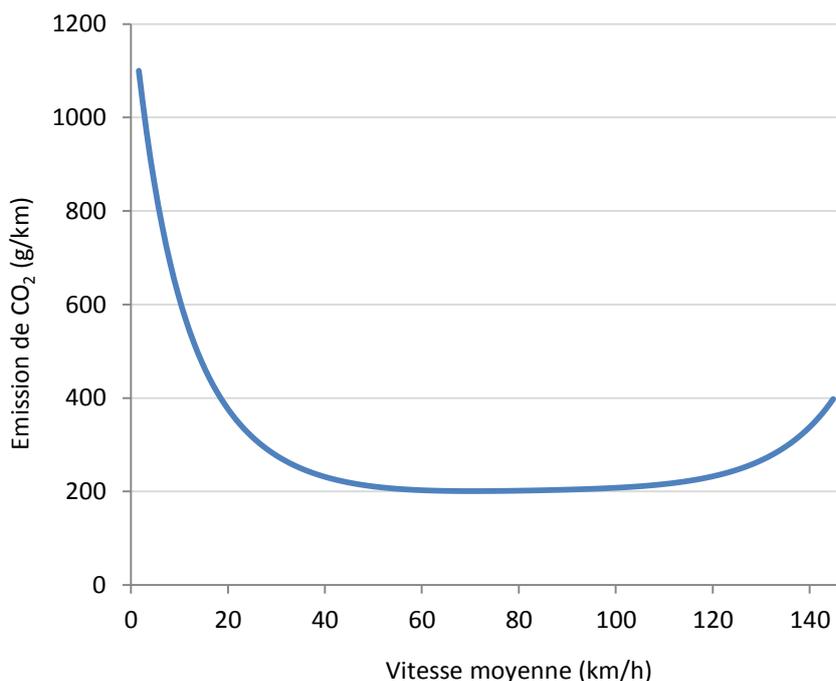


Figure 20: Relation entre quantité de dioxyde de carbone (CO₂) émise et vitesse moyenne des véhicules (adapté de Barth & Boriboonsomsin, 2008).

La courbe dessinée prend la forme d'un « U » et indique que la quantité de CO₂ émise par kilomètre est importante lorsque les vitesses moyennes sont faibles et lorsqu'elles sont élevées. À faible vitesse, dans des conditions de circulation typiques d'une autoroute congestionnée, les fortes émissions de CO₂ (pour autant que celles-ci soient exprimées par unité de distance parcourue) peuvent être expliquées non seulement par les phases d'accélération et de décélération successives, mais également par le fait que les véhicules ne parcourent qu'une faible distance : le taux d'émission de CO₂ par kilomètre atteint alors des valeurs très importantes (celui-ci étant théoriquement infini lorsque les véhicules sont à l'arrêt ; il faudrait en effet un temps infini à 0 km/h pour parcourir 1 km) (Barth & Boriboonsomsin, 2008). En revanche, lorsque les véhicules circulent à des vitesses beaucoup plus importantes, les charges de moteur augmentent et nécessitent la consommation d'une plus grande quantité de carburant, ce qui émet davantage de CO₂ par distance parcourue (Barth & Boriboonsomsin (2008), Woensel & de Kok (2012)).

Le modèle met ainsi en évidence une augmentation considérable des émissions de dioxyde de carbone lorsque la route est congestionnée (voir le cas des vitesses inférieures à 20 km/h en Figure 20). La quantité de CO₂ émise lorsque la vitesse moyenne de trafic est de 10 ou de 20 km/h peut ainsi atteindre de 2 à 3 fois la quantité de CO₂ émise lorsque le trafic se déplace à une vitesse moyenne de 90 km/h. On peut également noter que, toujours selon la relation exprimée en Figure 20, passer d'une vitesse moyenne de 120 à 130 km/h augmenterait la quantité de dioxyde de carbone émise de 15%. En revanche, réduire la vitesse moyenne du trafic de 120 à 90 km/h permettrait de réduire les émissions de CO₂ de 12%.

Selon une étude réalisée par Degraeuwe *et al.* (2012) sur un tronçon d'autoroute reliant Liège à Anvers, une réduction de la vitesse moyenne du trafic de 120 à 90 km/h réduirait la quantité de CO₂ émise dans l'atmosphère de 17,5 g/km (soit une diminution de 8,4% contre 12% selon le modèle développé par Barth & Boriboonsomsin, 2008). L'estimation des variations des taux de CO₂ émis en fonction de la vitesse varie sensiblement d'une étude à l'autre. Cela est notamment dû à la diversité des paramètres considérés dans les différentes études (type d'utilisateur, capacité du réseau, etc.) et à certaines particularités régionales (type d'infrastructure, caractéristiques des véhicules, part du trafic lourd⁷, etc.) qui sont prises en considération

⁷ Les émissions de CO₂ émises par le trafic lourd étant, par exemple, moins influencées dans le cas d'une diminution de la vitesse maximale autorisée de 120 à 90 km/h.

dans les modèles. En considérant qu'environ 38,5 milliards de kilomètres sont parcourus chaque année sur nos autoroutes⁸ et en utilisant les ratios proposés dans Degraeuwe *et al.* (2012), une réduction de la vitesse moyenne du trafic de 120 à 90 km/h résulterait en une diminution annuelle d'environ 670.000 tonnes de CO₂. En plus d'une réduction de la quantité de CO₂ émise, cette limitation de vitesse aurait pour effet de réduire l'émission d'autres polluants atmosphériques tels que les NO_x (-26,9%) et les particules fines (PM₁₀) (-1,2%) (Degraeuwe *et al.*, 2012).

3.6.3 Impact de la vitesse sur la pollution sonore

En plus des émissions de gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques, le bruit constitue également une source de pollution importante liée à la circulation routière. Les deux principales sources du bruit sont d'une part le bruit émis par le moteur du véhicule et, d'autre part, le bruit produit par le contact des pneus avec la route (Robertson *et al.*, 1998). Ces deux sources de pollution sonore sont influencées par la vitesse et par le type de conduite adopté (mais également par d'autres facteurs, tel que le revêtement de la route). La relation entre vitesse et intensité sonore est relativement complexe dans la mesure où le bruit du moteur est fortement influencé par le passage d'une vitesse à l'autre (Robertson *et al.*, 1998) et que celui-ci tend à dominer à faible vitesse alors que le bruit produit par le contact des pneus avec le sol tend à dominer à haute et moyenne vitesse (FEHRL, 2006). De manière globale, en additionnant ces deux effets, l'intensité sonore augmente avec la vitesse (à noter cependant que le temps d'exposition est plus court lorsque la vitesse est grande) et avec les accélérations (Robertson *et al.*, 1998).

3.7 Effets des vitesses variables dynamiques sur la sécurité, la mobilité et l'environnement

Les modèles décrits dans la littérature scientifique et conçus pour mesurer les effets de la vitesse ou des variations de vitesse sur les aspects de sécurité, de mobilité ou d'environnement, sont généralement complexes et recourent la plupart du temps à de nombreux paramètres (voir par ex. Ligterink *et al.* (2016), Ahn K. (2002), Geistefeldt J. (2011), Barlow T.J. & Boulter P.G. (2009), Duret, A. (2014)). Ces paramètres sont de natures différentes et nécessitent des données propres à l'infrastructure routière (ex : nombre de bandes de circulation, présence d'entrées ou de sorties d'autoroutes, etc.), au trafic routier (ex : types d'usagers et de véhicules, distribution des véhicules sur le réseau, niveaux de consommation, etc.) ou encore à la législation en vigueur (vitesse maximale autorisée).

La plupart de ces modèles démontrent qu'en plus de la vitesse moyenne pratiquée, la variation des vitesses au sein d'un flux de trafic joue un rôle prépondérant tant du point de vue de la sécurité des usagers que du point de vue de la mobilité et de l'environnement. L'analyse des effets de la vitesse et de la variation des vitesses sur ces différents aspects souligne l'importance de favoriser l'homogénéité des vitesses des véhicules en circulation sur les autoroutes (d'autant plus lorsque l'intensité du trafic est importante). L'homogénéisation des vitesses peut être rendue possible par l'intermédiaire des limites de vitesse variables (VSL) (Garcia-Castro & Monzon, 2014), en particulier, par la régulation dynamique des vitesses qui permet d'adapter la vitesse des véhicules en tenant compte des conditions réelles de circulation. Ces systèmes de régulation dynamique de vitesses peuvent contribuer à fluidifier la circulation en incitant les usagers à adopter des vitesses plus homogènes et plus adaptées en fonction des objectifs recherchés. Compte tenu de l'analyse des effets de la vitesse et de l'homogénéité des vitesses sur les aspects de sécurité, de mobilité et d'environnement décrits précédemment, nous pouvons résumer certains points importants:

- En matière de mobilité, une élévation de la vitesse maximale autorisée sur autoroute n'a que peu d'influence sur les conditions de circulation (du moins lorsque le trafic est dense et que le débit de circulation est suffisamment important) et ne permet pas de résoudre efficacement les problèmes de congestion. Une augmentation de la limite de vitesse peut néanmoins avoir un effet bénéfique

⁸ Le nombre de kilomètres parcourus sur les autoroutes belges, en constante augmentation, était de 38,5 milliards de véhicules-kilomètres en 2015 (selon le SPF Mobilité et Transports, 2016).

sur la réduction des temps de parcours⁹, mais uniquement lorsque le trafic est de faible intensité et que le débit de circulation est faible. Rappelons toutefois l'impact négatif que représente une telle mesure sur la sécurité des usagers. Une homogénéisation des vitesses contribuerait, quant à elle, à favoriser les flux de circulation, à augmenter la capacité du réseau et donc à limiter les phénomènes de congestion.

- Une circulation des véhicules à grande vitesse augmente le risque et la gravité des accidents. Une réduction de la vitesse maximale autorisée ainsi qu'une homogénéisation des vitesses ont pour effet de réduire les risques d'accidents. Cette thèse a pu être validée à travers différents modèles, tels que ceux décrits précédemment. En effet, plus la variabilité des vitesses dans un flux de trafic est grande, plus le taux d'accidents est élevé. En outre, plus l'écart entre la vitesse moyenne des véhicules et la limitation de vitesse est important, plus le taux d'accidents sera élevé.
- Outre les aspects sécuritaires et de mobilité, la vitesse moyenne de trafic joue également un rôle non négligeable par rapport à la quantité de gaz à effet de serre et de polluants émis dans l'atmosphère. La circulation sur autoroute en-dessous d'un certain seuil de vitesse réduirait la quantité de CO₂ émise dans l'atmosphère à un niveau minimal (en dehors des conditions de congestion routière). Lorsque le trafic se déplace à des vitesses supérieures à un certain seuil, les émissions de CO₂ augmenteraient de manière exponentielle avec la vitesse. Les quantités de polluants atmosphériques émis tels que le NO₂ et les particules fines évolueraient selon une même tendance. Plus que la vitesse moyenne pratiquée, l'émission de gaz à effet de serre et de polluants atmosphérique dépend surtout de l'effet des accélérations et freinages successifs des véhicules, ce qui souligne ici encore l'importance d'une harmonisation des vitesses des véhicules dans le flux de trafic.

À travers différentes études de cas menées en Europe, Garcia-Castro & Monzon (2014) résumant plusieurs effets liés à la mise en place d'une régulation dynamique des vitesses sur autoroute. Ces effets concernent plusieurs variables relatives à la sécurité, à la mobilité et à l'environnement (Tableau 5).

⁹ Selon le Ministère des Transports aux Pays-Bas, une hausse de la limitation de vitesse de 120 à 130 km/h mènerait à une réduction maximale du temps de parcours de 8% (van Benthem, 2015).

Tableau 5: Effets liés à la mise en place d'une régulation dynamique des vitesses sur autoroute (adapté de Garcia-Castro & Monzon, 2014).

Référence	Étude de cas	Variable(s)	Effets
Mobilité			
Makarewicz & Galuszka, 2011	Simulation	Écart-type de la vitesse moyenne	en fonction des scénarios
Zhikai <i>et al.</i> , 2004	Simulation	Volume de trafic Temps de parcours Longueur des files Nombre d'arrêts	variable
Hegyí <i>et al.</i> , 2005	Simulation	Temps de parcours total	-21,0%
Hoogendoorn, 1999	Simulation	Capacité	+2%
Highways Agency, 2004	M25, Royaume-Uni	Débit	+1,5%
Nissan & Bang, 2006	E4, Stockholm	Changements de bande	-50%
ECMT, 2007	A7, France	Congestion	entre -16% et -40%
Sécurité routière			
Lee <i>et al.</i> , 2007	Simulation	Risque d'accident	-25%
Robinson, 2000	Allemagne	Taux d'accident	-20%
Highways Agency, 2004	M25, Royaume-Uni	Dommages	-20%
ECMT, 2007	A7, France	Nombre d'accidents	entre -10% et -20%
Environnement			
Zegeye <i>et al.</i> , 2010	Simulation	Émissions totales	-35%
Highways Agency, 2004	M25, Royaume-Uni	Niveaux d'émissions	entre -2% et -8%
Highways Agency, 2004	M25, Royaume-Uni	Niveaux sonores	entre -0,7 et -2,3 dB
Land Tirol, 2012	A12, Autriche	Niveaux de NO ₂	-3,6%

Les exemples repris dans le Tableau 5 démontrent les effets positifs liés à l'utilisation de limites de vitesse variables. On peut ainsi remarquer que la mise en place d'une régulation dynamique des vitesses sur l'autoroute M25 au Royaume-Uni a eu des effets bénéfiques tant du point de vue de la sécurité (réduction des dommages) que du point de vue de la mobilité (amélioration relative des débits de circulation) et de l'environnement (réduction des niveaux de pollution sonore et des niveaux de pollution atmosphérique) (Highways Agency, 2004).

En Europe, ces systèmes de limites de vitesse variables sont de plus en plus souvent rencontrés sur les autoroutes et leur mise en place varie d'un pays à l'autre (CEDR, 2009). Les PMV représentent un moyen efficace pour communiquer la limite de vitesse maximale autorisée en fonction de données collectées en temps réel. Toutefois d'autres moyens existent : il s'agit par exemple des unités montée à bord d'un véhicule (ou « unités embarquées ») et utilisées dans le but d'afficher des informations sur le trafic (CEDR, 2009), mais également des adaptateurs de vitesse intelligents (ISA) décrits précédemment.

Chaque pays possède des infrastructures routières spécifiques et une législation propre en matière de limitations de vitesse. Les caractéristiques propres au trafic routier peuvent également varier (intensité du trafic, part du trafic lourd, types de véhicules, etc.). Les effets attendus d'une mise en place de limites de vitesse variables ne seront donc pas nécessairement les mêmes d'une autoroute à l'autre. L'étude menée par Degraeuwe *et al.* (2012) sur l'autoroute E313 reliant Anvers à Liège a montré, par exemple, que la mise en place de limites de vitesse variables n'a qu'un effet relativement limité sur la pollution sonore et sur les émissions de polluants atmosphériques, ces derniers atteindraient un seuil minimum à des vitesses de circulation autour de 90 km/h (Degraeuwe *et al.*, 2012).

3.8 Synthèse

Ce chapitre démontre que la vitesse est les variations de vitesse ont un impact significatif sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement.

Les éléments clés en termes de mobilité sont qu'une vitesse homogène entre véhicules permet d'obtenir un flux régulier et donc une capacité maximale de la voirie considérée. Les modifications dynamiques de vitesse en zones congestionnées semblent donc améliorer la fluidité du trafic et retarder l'apparition de bouchon.

En termes de sécurité routière, la littérature montre qu'une augmentation de vitesse entraîne une augmentation du risque et de la gravité des accidents. Les distances de freinage ainsi que les distances de sécurité sont allongées. A contrario, un management efficace des vitesses des automobilistes, entraînant comme décrit plus haut un flux homogènes de véhicules, est un point très positif pour la sécurité routière. En effet, ce type de déplacement homogène réduit les interactions entre véhicules, et donc les risques d'accidents.

Enfin, la vitesse semble être de manière générale mauvaise pour l'environnement. Une augmentation de la vitesse entraîne irrémédiablement une augmentation de la consommation de carburant, et donc une augmentation des émissions nocives. Par contre une diminution et homogénéisation des vitesses permettent de réduire les émissions en évitant les freinages et accélérations successifs.

4 VITESSE ET ADAPTATION DES VITESSES EN EUROPE

Ce chapitre s'intéresse aux limitations de vitesse dans différents pays européens. Il décrit également les systèmes qui sont mis en place pour adapter les vitesses sur les autoroutes.

4.1 Vue d'ensemble

Les limitations de vitesse sur autoroute en Europe sont différentes entre chaque pays. Elles se situent entre 100 km/h dans les pays nordiques et 140 km/h en Pologne et en Bulgarie. Bon nombre de pays européens appliquent aussi une limitation de vitesse différente pour les camions de plus de 3,5t. Tous ces résultats sont présentés dans le Tableau 6 et en Figure 21. Il existe une exception : en Allemagne, un tiers des autoroutes allemandes n'est soumis à aucune limitation de vitesse¹⁰ : cependant il y est recommandé de ne pas rouler à plus de 130 km/h.

¹⁰ www.zeit.de

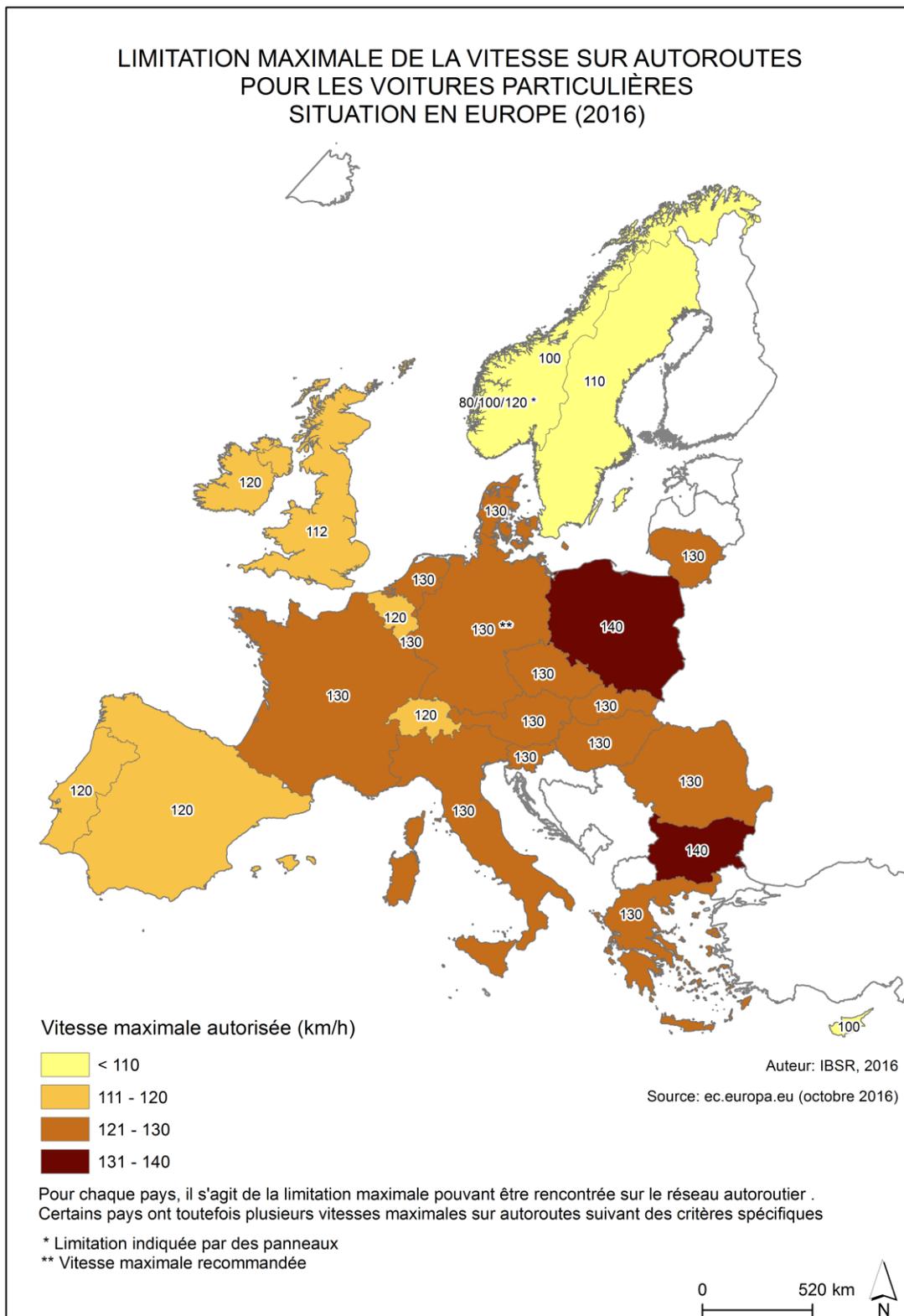


Figure 21: Limitations générales de vitesses sur autoroute en Europe

Par rapport à ses pays voisins, la Belgique possède une limitation maximale inférieure de 10km/h à la réglementation maximale autorisée. Toutefois, En France et aux Pays-Bas, les limitations sont également fréquemment adaptées à une limite plus basse. Ainsi, aux Pays-Bas, les exceptions concernent en 2016 près de 40% du réseau¹¹. Beaucoup de sections sont restées à la limitation de 120 km/h et il existe également des zones à 100 ou 80 km/h autour des agglomérations, ou pour raisons de qualité d'air, ou encore pour limiter le bruit. De plus, les limitations peuvent également être uniquement appliquées en journée (6-19 h), autorisant 130 km/h durant la nuit. En France, les conditions météorologiques influencent également les vitesses (110 km/h en cas de précipitations et 50 km/h en temps de brouillard). Par contre, la majorité du réseau a une vitesse maximale de 130 km/h.

Tableau 6: Limitations de vitesse sur autoroute en Europe pour les voitures particulières et les camions. Source : <http://ec.europa.eu>

Pays	Limitation voitures	Limitation camions
Allemagne	130 km/h (vitesse maximum recommandée)	80 km/h
Autriche	130 km/h	80 km/h
Belgique	120 km/h	90 km/h
Bulgarie	140 km/h	90 km/h
Chypre	100 km/h	80 km/h
Danemark	130 km/h	80 km/h
Royaume-Uni	113 (70 mph)	96 (60 mph)
Grèce	130 km/h	80 km/h
Hongrie	130 km/h	80 km/h
Irlande	120 km/h	80 km/h
Malte	Pas d'autoroutes	Pas d'autoroutes
Tchéquie	130 km/h	80 km/h
Roumanie	130 km/h	110 km/h
Slovaquie	130 km/h	90 km/h
Slovénie	130 km/h	90 km/h
Suède	110 km/h	70, 80 ou 90 km/h en fonction du type de camion

4.2 Technologie de l'adaptation de vitesse en Europe

L'objectif de cette partie est de dresser un état des lieux sommaire des technologies liées à l'infrastructure utilisées pour adapter et contrôler les vitesses sur autoroute en Europe. Tout d'abord, il existe des systèmes spécifiquement adaptés à l'implémentation de vitesses limites variables. Le contrôle des vitesses variables est généralement réalisé par la synergie entre les systèmes collectant les données de trafic et

¹¹ www.rijksoverheid.nl

météorologiques en temps réel, ceux permettant le traitement des données et enfin les systèmes d'affichage dynamiques de la vitesse (Sisiopiku, 2001).

La collecte des données et transmission des informations en temps réel est réalisée par *un système de transport intelligent* (ITS pour intelligent transport system en anglais ; ISO 14813-1:2015). Au sein de l'ITS, il existe différents services regroupés en domaines dont les opérations et gestion du trafic (Traffic management and operations), la surveillance des conditions météorologiques et environnementales (Weather and environmental conditions monitoring) qui concernent l'infrastructure autoroutière ou encore les services liés aux véhicules tels que les opérations concernant les véhicules automatisés. Toutes les autoroutes ne sont pas équipées de l'ensemble des systèmes mais nous donnons ici un aperçu global des systèmes de mesure utiles à l'adaptation des vitesses.

Le management et contrôle du trafic passe par une surveillance des conditions de trafic. Classiquement, les données de trafic sont collectées par des boucles de comptage à induction (simples ou doubles) fournissant des informations sur la quantité de trafic, l'occupation ainsi que sur la vitesse (pour les doubles uniquement). Il existe également des boucles de comptage virtuelles dont le comportement sera analogue aux boucles inductives standards. A ceci près que ce n'est plus la masse métallique qui est détectée mais la présence de groupes de pixels.

Dans certains pays, comme l'Angleterre, on fait appel au ramp metering pour contrôler le flux de trafic sur autoroute (Papageorgiou & Kotsialos, 2002). Cette technique consiste à installer des feux tricolores sur les voies d'accès aux autoroutes. En cas d'un début de congestion observé (souvent dû aux insertions de la voie d'accès), les feux passent au rouge pour une courte période, permettant de fluidifier le trafic sur l'autoroute en question. Ensuite, l'accès est à nouveau libéré.

Outre le volume de trafic, la vitesse peut également être mesurée par des systèmes calculant la vitesse moyenne et non instantanée. Les radars tronçons sont équipés d'une série de caméras le long d'une section de route. Une image de la plaque d'immatriculation et/ou du véhicule est enregistrée pour chaque véhicule à l'entrée et la sortie du segment ainsi que l'heure précise de chacun de ses passages (Soole, Watson & Fleiter, 2013). La distance exacte du tronçon étant connue, la vitesse moyenne est calculée sur base de la différence des temps de passage à l'entrée et à la sortie du tronçon. Les tronçons sont équipés de caméras utilisant les technologies ANPR (Automatic Number Plate Recognition) et OCR (Optical Character Recognition). Ce type de systèmes a également d'autres usages tels que de la détection des changements de voie, le repérage de véhicules volés ou encore des actions liées au contre-terrorisme.

Les données météorologiques sont quant à elles recueillies par des systèmes d'information placés le long des routes (ces systèmes sont généralement appelés en anglais, road-weather information systems (RWIS)). Il s'agit des conditions telles que l'intensité du vent et sa direction, la visibilité, l'humidité relative, l'intensité de la pluie ou encore les précipitations cumulées. Il est également possible de surveiller les conditions à la surface de la route telles que sa sécheresse, la présence de neige, de glace ou de sel.

L'industrie automobile subit toutefois une révolution en cours avec le développement des technologies de communication entre véhicules (V2V) et entre les véhicules et l'infrastructure (V2I). Le système de transport intelligent est dès lors susceptible d'évoluer à l'avenir pour intégrer de l'information provenant des véhicules mais également permettre à l'infrastructure de mieux avertir les systèmes embarqués dans les véhicules. Ainsi, Wang (2016) propose un système connecté de contrôle des vitesses limites variables couplé à un « car-following control » et une communication véhicule infrastructure pour résoudre les « stop and go waves ».

Les possibilités offertes par les technologies de communication embarquées sont nombreuses. Par exemple, les informations de trafic peuvent également être collectées via l'utilisation d'applications smartphones qui peuvent directement enrichir le système de transport. Une telle application a notamment été testée aux Pays-Bas à travers le projet ZOO^F¹².

¹² <http://www.zoof.nu/home.html>

Ces différentes technologies permettent aujourd'hui d'avoir une connaissance précise du trafic et des conditions météorologiques. Différents pays européens ont tiré parti de ces technologies pour mettre en place des systèmes de limitations des vitesses variables localement. Dans la section suivante, nous analysons en détail la réglementation sur les limitations de vitesse dans plusieurs pays européens en identifiant les éléments conduisant à la mise en place d'un système de vitesse variable ou d'une limitation locale différente.

4.3 Situation dans quelques pays européens

Les sections suivantes traitent plus en détail de l'expérience de quelques pays face aux vitesses sur autoroute. Elles ont été recueillies grâce à l'interview d'experts pour chacun des pays étudiés, afin d'y récolter quelques avis « d'hommes de terrains ».

4.3.1 Les Pays-Bas

L'autorité responsable des autoroutes aux Pays-Bas est le *Rijkswaterstaat*, le ministère de l'infrastructure et de l'Environnement. Tout est régi par la législation nationale. Sur les autoroutes, la limitation de vitesse générale est de 130 km/h pour les véhicules légers, et de 80 km/h pour les véhicules de plus de 3,5 tonnes. Il y a deux exceptions:

- Si l'état de la route est mauvais, une réduction de la vitesse est nécessaire
- Sur certaines routes, la limite est de 80 km/h en conformité avec la législation environnementale (pour le bruit principalement)

Sur les autoroutes, il existe en général quatre limites différentes de vitesses: 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h et 130 km/h (Ligterink, 2016) Cette dernière limitation de vitesse est très récente (2012). Ces segments doivent répondre à des exigences strictes, notamment une absence d'obstacles, une certaine largeur de voie, une certaine largeur de bande d'arrêt d'urgence, un certain éclairage, *etc.* Actuellement, la limitation de 130 km/h s'applique à 62% du réseau autoroutier néerlandais (1496km) (RWS, 2017). Le ministère est en train de faire une évaluation de l'augmentation à 130 km/h (Ligterink, 2016). Des études sont également en cours de réalisation pour savoir si les limitations doivent être réduite lors de mauvais temps (brouillard, pluie, peu de distance de la vue). Un test grandeur nature est d'ailleurs en train d'être réalisé.

Concernant le monitoring du trafic autoroutier, différents systèmes existent aux Pays-Bas. 80% du réseau est équipé de boucles de comptage ainsi que de caméras de surveillance du flux de véhicules. Des radars fixes sont présents, mais sont plus concentrés sur le réseau secondaire.

Concernant la signalisation, elle se fait principalement par panneaux fixes ou dynamique le long de la route. En moyenne, ils sont présent tous les 500 m.

Il y a eu d'important changements d'infrastructures aux Pays-Bas, en parallèle avec les modifications de limitations de vitesse, il est donc difficile d'étudier l'effet de ces variations pour le moment.

4.3.2 Allemagne

La réglementation en matière de limitations de vitesse en Allemagne est établie depuis de nombreuses années. Il n'existe en réalité pas de limitations légales de vitesses pour les voitures sur les autoroutes allemandes. Il existe seulement une recommandation de limiter sa vitesse à 130 km/h. La régulation se fait par les assurances. En effet, si une personne est prise dans un accident en tort et qu'il est prouvé que sa vitesse excessive a un impact sur l'accident, alors l'assureur pourra se retourner vers son assuré. Les réglementations sont différentes pour les camions (80 km/h), les voitures tractant quelque chose (80 km/h) ou les light trolleys (100 km/h).

Environ un tiers des autoroutes allemandes se contentent de cette recommandation. Pour les deux tiers restant, il existe des limitations ponctuelles de vitesses à 130 km/h ou moins. La compétence en matière de régime de vitesse incombe aux Länder (16 en Allemagne).

Ces limitations sont généralement liées à des conditions particulières de roulage (tunnel, approche d'une zone à risque, accumulation d'eau sur la chaussée lors de pluie, etc.). De façon intéressante, la nuit, il peut exister des limitations de vitesse (de 22h à 6h), principalement pour des questions de bruit aux abords des villes (par ex. autour de Cologne).

Il n'existe pas officiellement de futurs développements en matière de modification (création) de limitations de vitesse sur autoroute.

La population quant à elle serait partiellement d'accord de discuter de la création de limitations de vitesse (environ 56% de la population¹³). La raison principalement invoquée est la protection de l'environnement mais aussi la peur sur autoroute engendrée par le passage rapide de certaines automobiles sur la troisième bande.

4.3.3 Autriche

En Autriche, la limitation générale de vitesse sur autoroute est fixée à 130 km/h pour les voitures, 80 km/h pour les camions et bus, 100 km/h pour les voitures avec remorques (> 750 kg) ou dont le poids combiné (voiture + remorque) est inférieur à 3,5 tonnes, 80 km/h pour les autres voitures avec remorque. Le ministère des transports est chargé de fixer les limites de vitesse sur les autoroutes (sauf pour les limites de vitesse temporaires lors de travaux). Par conséquent, il n'y a généralement pas de différences régionales entre les régimes de vitesse.

Il existe toutefois une exception : certaines régions, afin d'atteindre leurs objectifs en terme de réduction d'émissions de particules, imposent des limitations de vitesse plus basses dans certaines zones. C'est notamment le cas de plusieurs sections dans le Tyrol où la limitation est fixée à 100 km/h ou encore au niveau de l'autoroute passant par Salzbourg où la vitesse est réduite à 80 km/h. C'est la réduction principalement des particules NO_x qui est visée par cette mesure. Sur l'autoroute autour de Vienne, la vitesse est réduite à 80 km/h pour les voitures et 60 km/h pour les camions (raison environnementale / fluidité de trafic).

En outre, le réseau autoroutier autrichien est fortement équipé de capteurs permettant d'établir les conditions de trafic, les vitesses pratiquées sur le réseau mais également de surveiller les conditions météorologiques sur les routes : capteurs de température (notamment pour la détection du gel) et de précipitations. Il existe ainsi des limitations locales de la vitesse tenant compte des éléments suivants : état de la route, conditions de trafic et météorologiques, présence de travaux, réduction du bruit, pollution et accidentalité. Ces différents aspects peuvent être croisés pour l'introduction d'une limitation temporaire. Par exemple, une section du réseau enregistrait un nombre important d'accidents lorsqu'il pleuvait.

L'Autriche a également expérimenté dans le passé une augmentation de vitesse sur un tronçon de 12 km d'autoroutes. La limite a été portée à 160 km/h mais cette augmentation n'était valide que pour de très bonnes conditions climatiques et de trafic. Cette décision fut retirée sous le gouvernement suivant et une évaluation complète de l'impact de cette mesure n'a pu être réalisée. Toutefois, d'autres pays, tels que la Pologne ou la République Tchèque discutent actuellement la possibilité d'augmenter les limitations jusqu'à 160 km/h dans leur pays sur certains segments et ils utilisent l'expérience autrichienne pour justifier ou supporter leur démarche.

En termes de contrôle, l'Autriche a mis en place des radars tronçons, principalement dans les tunnels mais également sur les tronçons à haut risque d'accidentalité. Les radars tronçons en Autriche ne sont autorisés que si la sécurité des conducteurs est menacée pour des raisons de respect de la vie privée. Les images des caméras ANPR sont directement détruites et seuls les excès de vitesse sont enregistrés dans le système. Des radars tronçons sont également systématiquement installés lors de travaux sur la voirie impliquant une diminution de la limitation de vitesse. En effet, de nombreux accidents étaient observés sur ces routes en travaux et l'installation de ces radars a permis de réduire ce nombre.

¹³ Enquête YouGov

4.3.4 La France

En France, la vitesse maximale autorisée sur les autoroutes est fixée à 130 km/h (depuis 1974). En cas de pluie (ou d'autres précipitations), la limitation de vitesse est réduite à 110 km/h (ceci depuis 1982). Dans le cas où la visibilité est inférieure à 50 mètres, la vitesse maximale se limite à 50 km/h (cette règle est d'application depuis 1992 pour l'ensemble du réseau routier).

Certains types de véhicules circulant sur les autoroutes font toutefois l'objet d'exceptions. Il s'agit des poids lourds (> 3,5 t) qui ne sont autorisés à dépasser 90 km/h. Les camions transportant des matières dangereuses (et dont le poids excède 12 t) sont autorisés à circuler à une vitesse maximale de 80 km/h. Enfin, les autobus et les autocars sont autorisés à circuler jusqu'à une vitesse de 100 km/h, sauf si ceux-ci sont dépourvus d'un système ABS et que leur poids dépasse 10 tonnes (dans ce cas, leur vitesse maximale est limitée à 90 km/h).

Dans certains cas, une limite permanente de vitesse plus réduite est fixée en tenant compte des caractéristiques géométriques des tronçons d'autoroute : par exemple, en présence de fortes pentes, de virages serrés, de bandes ou d'accotements étroits, de tunnels, etc. Par ailleurs, ces dernières années, la mise en place de limites de vitesse temporaires a vu le jour sur plusieurs autoroutes urbaines afin de réduire les émissions des véhicules lors de pics de pollution. D'autre part, des systèmes de régulation dynamique des vitesses sont utilisés pour augmenter la capacité et pour retarder ou éviter la congestion du réseau. De nouveaux systèmes de régulation dynamique de la vitesse sont d'ailleurs prévus sur l'autoroute A6 (reliant Paris à Lyon) et sur plusieurs autoroutes urbaines à proximité de Lille (A1, A22, A23, A25) et à proximité de Nancy (A33).

La généralisation des boucles de détection et des magnétomètres sur le réseau autoroutier français permet une surveillance étroite des conditions de trafic. D'autres technologies telles que les caméras de vidéo-surveillance sont aussi utilisées afin de détecter les incidents (DAI - *Détecteurs Automatiques d'Incidents*) ou les bouchons (DAB - *Détecteurs Automatiques de Bouchons*). Plus rarement, des lecteurs automatiques de plaques d'immatriculation (LAPI) et les données de véhicule flottant GPS (*Floating Car Data*) sont utilisés pour la gestion du trafic. Les usagers de la route sont informés des conditions de circulation grâce à des panneaux à messages variables (positionnés sur un portique ou sur les accotements) ou par message radio indiquant si une régulation spécifique est activée. Notons qu'un projet de véhicules connectés et équipés de capteurs a récemment été lancé¹⁴. La technologie embarquée permettrait de collecter des données liées aux conditions de déplacement dans le but notamment d'améliorer la sécurité routière ou de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Le contrôle des vitesses (réglementées par des limitations de vitesse permanentes ou temporaires) se base sur un réseau constitué d'environ 2.500 caméras fixes, 500 radars mobiles opérés par les forces de police, 200 caméras mobiles utilisées provisoirement (en cas de travaux), et de 380 voitures équipées de caméras mobiles capables de mesurer la vitesse des autres véhicules. Toutefois, pour des raisons légales, les limites de vitesse variables établies sur base des systèmes dynamiques ne font pas l'objet de contrôles par radars fixes.

Il n'existe actuellement pas de plan national visant à modifier la réglementation en vigueur, qu'il s'agisse des limitations de vitesse permanentes ou temporaires. La mise en place de limites de vitesse variables particulières sur autoroute relève de la compétence du préfet de département. En cas d'expérimentation, les gestionnaires de réseau sont tenus de réaliser une évaluation en relation directe avec l'objectif lié à la nouvelle mesure.

¹⁴ Voir le projet de recherche SCOOP@F

4.3.5 Synthèse

L'analyse des situations étrangères montre qu'il n'y a pas de consensus actuellement sur la vitesse optimale à adapter sur autoroute. Si les Pays-Bas ont décidé récemment d'augmenter la vitesse maximale à 130 km/h, l'expérience est encore trop récente pour tirer des conclusions en termes de sécurité routière.

Dans la plupart des pays interviewés toutefois, il semble que l'adaptation dynamique des vitesses soit un élément essentiel de la gestion du trafic permettant des adaptations temporaires lors de conditions de trafic ou météorologiques défavorables.

Si dans de nombreux pays, la vitesse maximale autorisée est de 130 km/h, cette limitation n'est en pratique implémentée que sur une partie restreinte du territoire. Des vitesses inférieures à 120 km/h, notamment aux abords des grandes agglomérations sont également pratiquées. Signalons dans ce contexte que la Belgique possède quant à elle un territoire fortement urbanisé et des distances inter-villes faibles.

4.4 Transférabilité des principes européens aux routes belges

Une question particulière qui se pose est la possibilité et l'opportunité de transférer des approches concernant la limitation et l'adaptation des vitesses sur autoroute vers la Belgique. Étudier la transférabilité d'une approche n'est pas chose facile. Les caractéristiques du réseau routier, les mobilités ou encore les attitudes dans le trafic sont différentes d'un pays à l'autre. Étudier la transférabilité, c'est d'abord remettre en contexte la Belgique par rapport aux autres pays européens. Dans cette partie, nous effectuons dans un premier temps cette comparaison sur l'infrastructure et son accidentalité. Dans un second temps, nous comparons le comportement du conducteur face à la vitesse sur autoroute au travers des attitudes des conducteurs belges et européens.

4.4.1 Comparaison de l'infrastructure autoroutière et de l'accidentalité sur autoroute entre les pays européens

Le Tableau 7 présente la proportion de voies autoroutières dans chaque pays d'Europe.

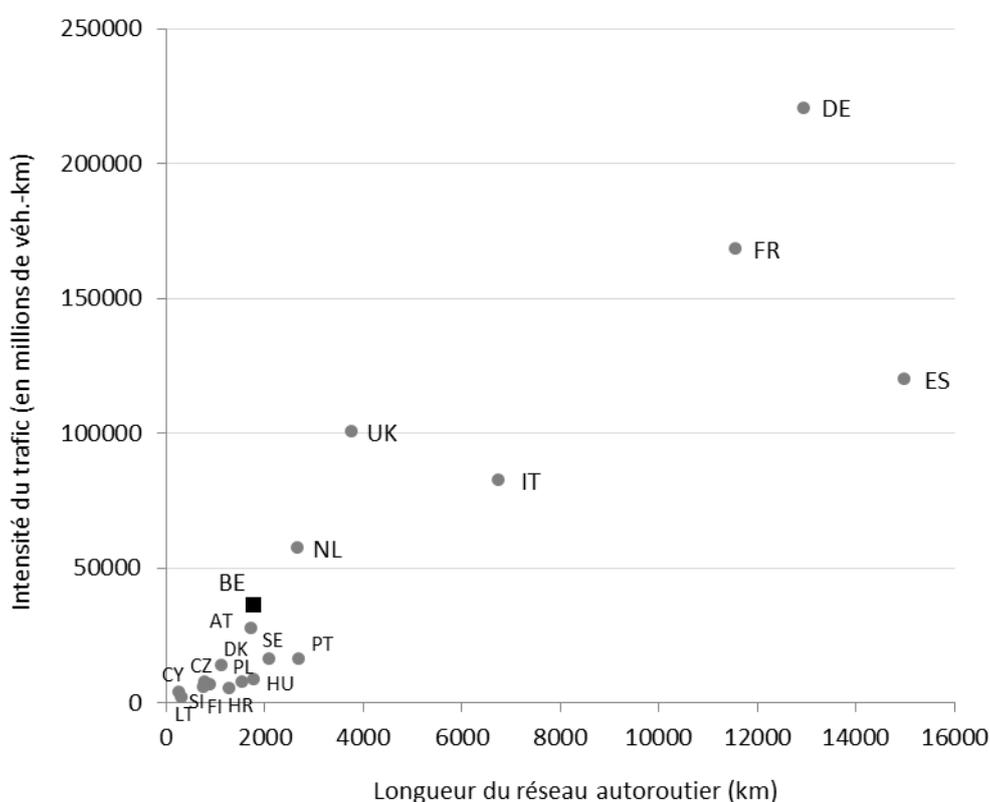
Tableau 7: Comparaison des réseaux autoroutiers et de leur accidentalité dans différents pays d'Europe

Code	Pays	Population (en millions d'habitants)	Morts sur autoroute en 2014	Longueur autoroutes (en km)	Proportion d'autoroute (%)	Trafic sur autoroute (millions vehicules.km)	Décès par million d'habitant	Décès par milliards de vehicules.km
AT	Autriche	8,1	41	1719	1,9	27370	5,1	1,5
BE	Belgique	11,3	108	1763	1,2	36153	9,6	3,0
CH	Suisse	7,1	21	1429	2,6	/	3,0	/
CY	Chypre	1,1	6	257	/	3625	5,5	1,7
CZ	Tchéquie	10,5	32	776	/	7709	3,0	4,2
DE	Allemagne	82,5	414	12949	1,9	220667	5,0	1,9
DK	Danemark	5,7	16	1128	1,4	13775	2,8	1,2
ES	Espagne	44	277	14981	7,8	119739	6,3	2,3
FI	Finlande	5,2	6	881	/	6792	1,2	0,9
FR	France	65	298	11560	1,2	168354	4,6	1,8
HR	Croatie	4,2	18	1290	/	5300	4,3	3,4
HU	Hongrie	9,9	34	1781	/	8377	3,4	4,1
IT	Italie	57	305	6751	5,4	82320	5,4	3,7
LU	Luxembourg	0,5	3	152	/		6,0	/
NL	Pays-Bas	16,2	81	2678	1,8	57224	5,0	1,4
PL	Pologne	38,5	61	1556	/	7748	1,6	7,9
PT	Portugal	10,5	61	2705	/	16159	/	3,8
RO	Roumanie	20	19	683	/	/	1,0	/
SI	Slovénie	2	15	770	1,5	5569	7,5	2,7
UK	Royaume-Uni	59,6	111	3759	3,7	100435	1,9	1,1

La proportion en autoroutes par rapport au réseau total routier pour chaque pays, ou par rapport au nombre d'habitant est très variable en fonction du pays considéré. Ces différences importantes ne semblent pas être corrélées avec la technologie de management du trafic utilisé.

La Belgique se trouve dans la moyenne avec ses 14,5 km/1000 habitants et 1% de ses infrastructures qui sont des autoroutes. Du point de vue de l'accidentalité, la Belgique n'est pas très bien placée si l'on rapporte le nombre de décès par million d'habitants : en effet on a noté en 2014 neuf décès par million d'habitant. Cependant, rapporté au trafic routier extrêmement élevé, la Belgique se trouve dans la moyenne européenne. Si on se rapporte aux limitations de vitesse dans les différents pays d'Europe (Figure 21) on constate que ce n'est pas parce que notre limitation de vitesse est plus basse que le l'accidentalité est moins élevée.

La Figure 22 met en relations l'intensité du trafic en fonction de la longueur du réseau autoroutier. On constate que l'intensité du trafic est plus élevée que d'autres pays ayant le même réseau autoroutier (environ 2000 km).



Source : Eurostat (2017), ETSC (2015) | Infographie : IBSR

Figure 22: Intensité du trafic en fonction de la longueur du réseau autoroutier dans différents pays européens

4.4.2 Comparaison des attitudes entre pays européens.

En 2015, une grande enquête européenne, ESRA (European Survey of Road users' safety Attitude) a sondé des ressortissants de 17 pays en Europe sur leurs attitudes de conduite (résultats principaux consultables dans Torfs et al, 2016). La vitesse faisait partie des thématiques analysées en détail par cette étude.

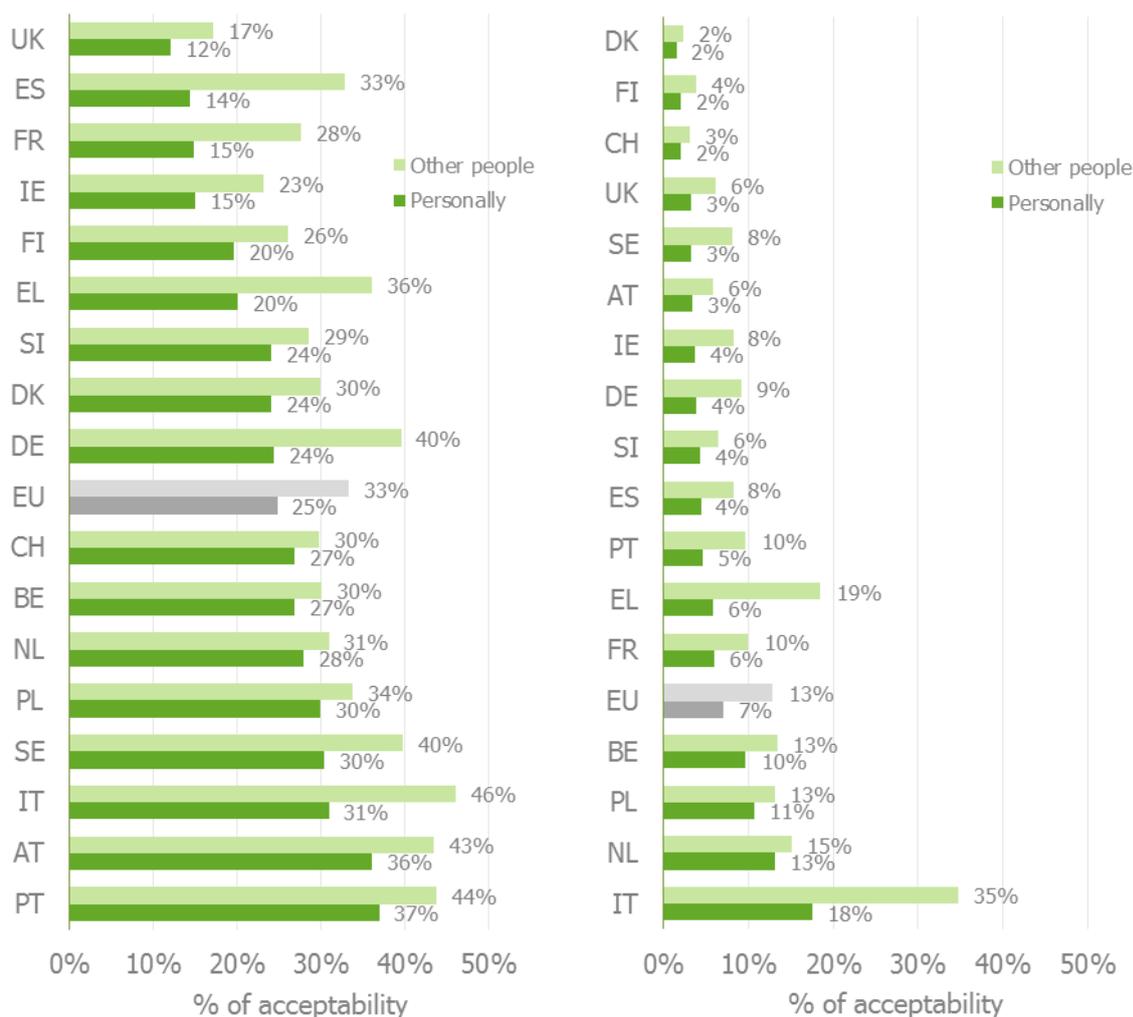


Figure 23: Acceptabilité (pour soi, «personally» ou pour les autres conducteurs, «other people») de conduire 20 km/h plus vite que la limitation de vitesse en vigueur sur une autoroute (à gauche) et sur une route résidentielle (à droite) par pays (% d'acceptabilité: scores 4 et 5 d'une échelle Likert allant de 1 (inacceptable) à 5 (acceptable)). Source : Yannis, G., Laiou, A., Theofilatos, A., & Dragomanovits, A. (2016).

27 % des Belges trouvent qu'il est acceptable de conduire à une vitesse de 20 km/h au-dessus de la limitation sur les autoroutes (Figure 23). Ce pourcentage est plus élevé que la moyenne européenne. De plus, en comparaison avec les autres types de routes, l'acceptabilité des infractions de vitesse est beaucoup plus grande sur les autoroutes.

On pourrait s'attendre à ce qu'il existe une relation entre le pourcentage d'acceptabilité et la valeur de la limitation de vitesse par pays. Il n'en est rien. Ainsi, au Royaume-Uni, très peu de répondants trouvent qu'un tel comportement est acceptable alors qu'il s'agit d'un des pays avec la plus basse limitation de

vitesse. Par contre, la Pologne, l'Autriche ou encore l'Italie ont des limitations supérieures ou égales à 130 km/h mais constituent les pays avec les pourcentages d'acceptabilité personnelle les plus élevés.

L'acceptabilité personnelle, indépendamment du type de route, est encore plus élevée pour le fait de rouler à 10 km/h au-dessus de la limitation de vitesse, atteignant 31% des Belges (Figure 24).

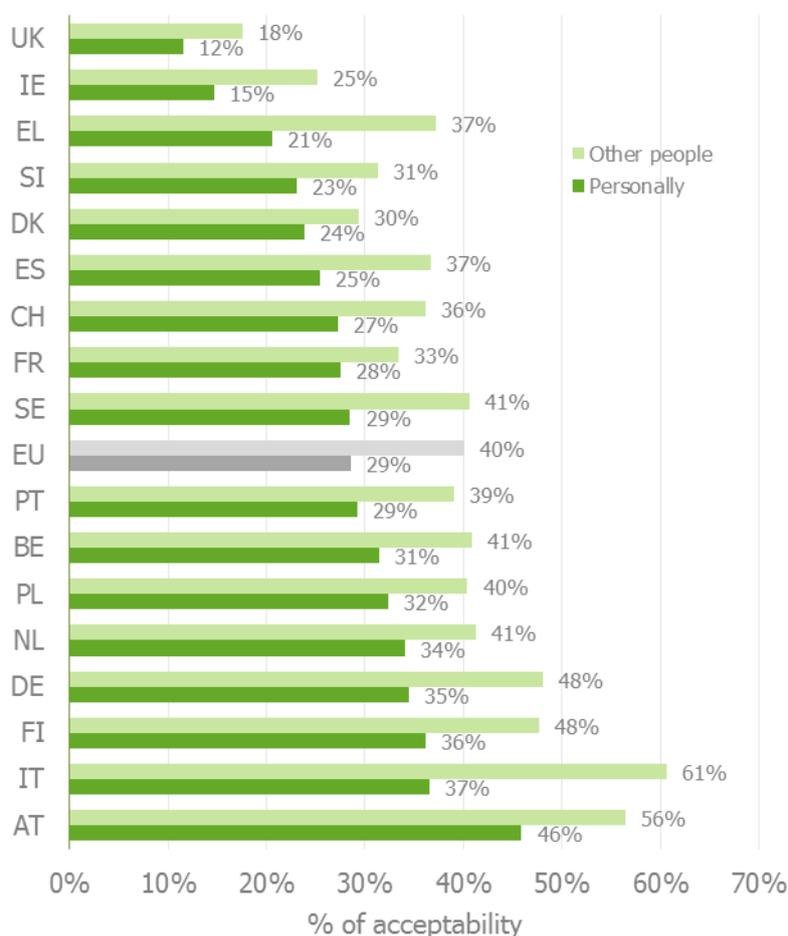


Figure 24: Acceptabilité de conduire jusqu'à 10 km/h plus vite que la limitation de vitesse légale, par pays (% d'acceptabilité: scores 4 et 5 d'une échelle Likert allant de 1 (inacceptable) à 5 (acceptable)). Source : Yannis, G., Laiou, A., Theofilatos, A., & Dragomanovits, A. (2016).

Au niveau des comportements auto-déclarés (Tableau 8), 74% des Belges déclarent avoir au moins une fois conduit à une vitesse supérieure à la limitation de vitesse sur autoroute au cours des 12 derniers mois. Ce résultat est similaire à la moyenne européenne (73%). Il ne semble, ici non plus, pas y avoir de lien, entre le respect de la limitation et le niveau de celle-ci. Ainsi, la Pologne et le Royaume-Uni sont les deux pays avec les pourcentages le plus faibles alors que les vitesses maximales autorisées sur autoroute sont respectivement de 140 et 113 km/h. Il n'y a pas de différence fondamentale entre les pourcentages chez nos voisins : 64 % pour les Français contre 78% pour les Néerlandais.

Tableau 8: Excès de vitesse auto-déclarés durant les 12 derniers mois en Europe et par pays (% des personnes l'ayant fait au moins une fois au cours des 3 derniers mois). Source : Yannis, G., Laiou, A., Theofilatos, A., & Dragomanovits, A. (2016).

Code pays	Conduisent plus vite que la limite autorisée (% au moins une fois) sur voies rapides/autoroutes
AT	81%
BE	74%
CH	80%
DE	80%
DK	81%
EL	71%
ES	74%
FI	84%
FR	68%
IE	61%
IT	76%
NL	78%
PL	57%
PT	81%
SE	83%
SI	73%
UK	66%
EU17	73%

Enfin, les Belges, tout comme les Européens, sont peu conscients des risques liés à une vitesse inappropriée (Figure 25). Ainsi seul 39% des Européens de 18 à 34 ans sont d'accord avec le fait qu'en augmentant de 10 km/h la vitesse, le risque d'être impliqué dans un accident augmente fortement.

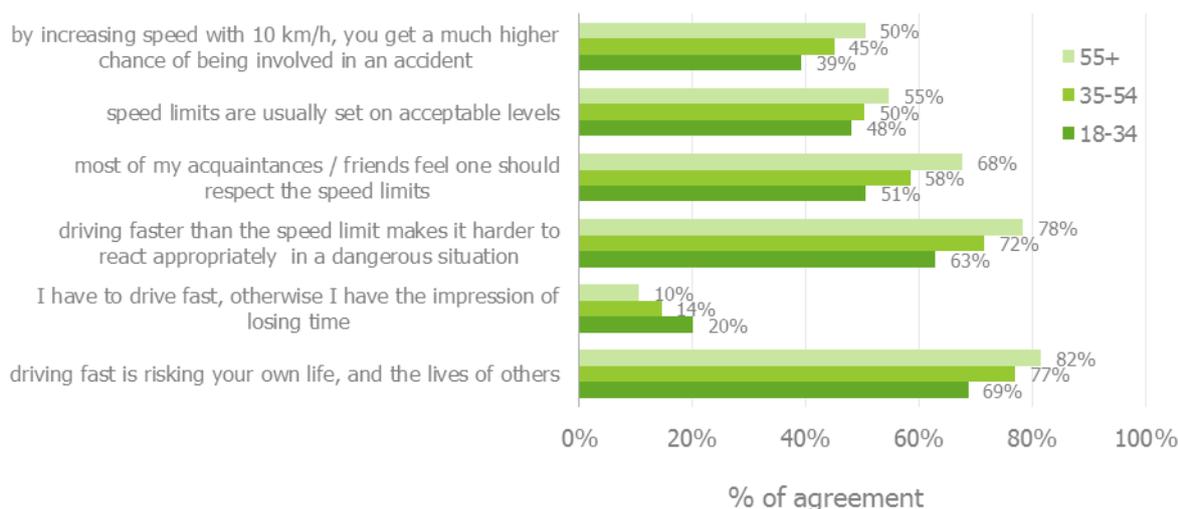


Figure 25: Les opinions sur la vitesse en Europe et son influence sur la sécurité routière, par groupe d'âge. Source : Yannis, G., Laiou, A., Theofilatos, A., & Dragomanovits, A. (2016).

Ces résultats nous montrent que la vitesse n'est que peu appréhendée comme un facteur de risque et aggravant d'accidents dans les pays européens. Les infractions de vitesse y sont nombreuses et l'acceptabilité par rapport aux excès de vitesses y est élevée. De plus, le niveau d'acceptabilité ne semble pas lié à la valeur de la vitesse maximale autorisée. Les Belges ne font pas exception.

4.4.3 Synthèse

Les éléments importants de ce chapitre sont les suivants. Tout d'abord, les limitations de vitesse sur autoroute varient entre pays européens, allant de 100 à 140 km/h. Les pays limitrophes de la Belgique (France, Pays-Bas, Luxembourg et Allemagne) ont tous une limitation (ou vitesse maximale suggérée) de 130 km/h.

Ces vitesses sont toutefois fréquemment diminuées sur certains tronçons pour des questions de mobilité, de sécurité ou environnementales. En pratique, une limite inférieure à la limite légale peut concerner près de 40% du réseau routier (cas des Pays-Bas). De plus, grâce aux systèmes de transport intelligents, de nombreux pays européens ont mis en place des limitations de vitesse dynamiques. Ces limitations sont souvent couplées à des méthodes de contrôles de vitesses (radars, radars tronçons) afin de s'assurer du respect des vitesses imposées.

En Belgique, tout comme en Europe, l'acceptabilité est grande pour de petites infractions (de 10 à 20 km/h) à la vitesse maximale autorisée. Cette acceptabilité n'est pas liée à la valeur de la limitation de vitesse et les Belges ne sont que peu conscients des risques associés à de petits excès de vitesse (Etude ESRA). La proportion d'Européens par pays commettant des excès de vitesse n'est pas non plus liée à la valeur de la limitation.

Enfin, étant donné le développement des technologies de communication V2V et V2I, l'infrastructure est susceptible de jouer un rôle important dans la régulation des vitesses à l'avenir.

Sur base de ces éléments, il semble important de tester et simuler les effets d'une augmentation de la vitesse maximale à 130 km/h. On ne peut prédire les changements de comportement mais on peut toutefois évaluer les impacts de l'introduction d'une telle mesure sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement sous l'hypothèse d'un respect de cette nouvelle limitation. Cette modification poursuivrait l'objectif d'harmonisation avec les pays limitrophes.

D'autre part, la Belgique pourrait également tirer parti des technologies disponibles afin d'exploiter encore mieux les systèmes de vitesse dynamique. Ces systèmes peuvent potentiellement avoir un impact sur l'acceptabilité. De plus, si l'objectif poursuivi par une augmentation de la vitesse limite est tout d'abord un

gain de temps, les belges perdent de nombreuses heures dans les zones congestionnées. L'augmentation des systèmes de limites dynamiques pourrait permettre de diminuer la congestion. Enfin cette introduction de limites dynamiques semblerait diminuer la congestion plus efficacement qu'un rehaussement des limites de la vitesse maximale autorisée.

5 SIMULATION DES HYPOTHÈSES DE CHANGEMENT DE LIMITATIONS DE VITESSE

5.1 Introduction à la modélisation du trafic

Afin de pouvoir tester les hypothèses de travail mises en évidence dans les sections précédentes, il faut définir un cadre de travail. S'agissant d'une première étude, il n'est pas possible de tester les variations de vitesses sur le terrain.

Le choix a donc été fait de créer un modèle de trafic du réseau routier et autoroutier belge. Ce volet de l'étude a été réalisé par la société Stratec sous la supervision de l'IBSR. Ce modèle est développé à deux échelles. À l'échelle macro, il modélise les flux du réseau des voiries principales belges (principalement les autoroutes et les routes nationales) ainsi que du réseau des principales autoroutes des pays limitrophes afin d'assurer une simulation cohérente des flux internationaux. À l'échelle méso, la simulation intègre également deux sous-réseaux concernant la Région bruxelloise ainsi que l'agglomération liégeoise. Cette résolution permet de prendre en compte les goulots d'étranglement, les intersections, les feux, *etc.* Ce réseau est présenté en Figure 26.

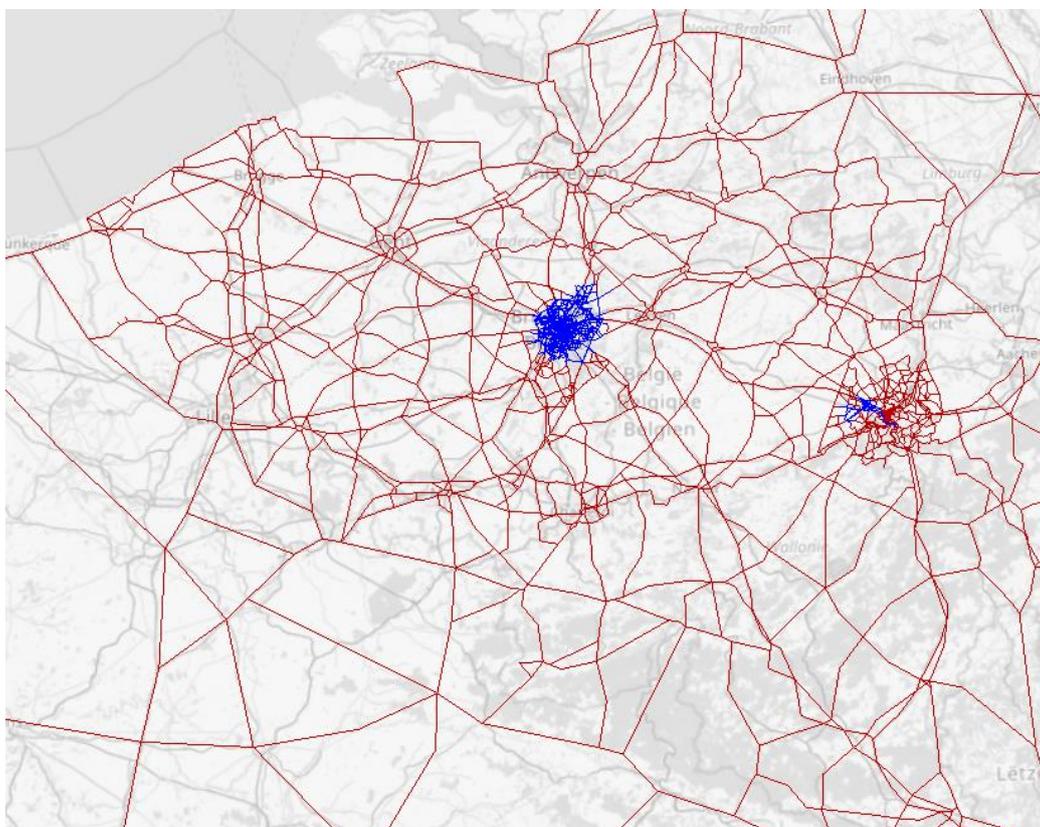


Figure 26: Réseau routier modélisé. Les arcs rouges correspondent au réseau macroscopique, les arcs bleus correspondent au réseau mésoscopique.

Concernant le ring d'Anvers, étudié ici en modélisation macroscopique. Le lecteur intéressé est invité à se reporter à l'étude du MOW (Bijnsgebouw, 2015) ayant modélisé cette partie du réseau belge. L'étude porte sur une réduction de la vitesse autorisée à 70 km/h et en étudie l'effet en microsimulation. Cette échelle permet de modéliser individuellement les véhicules, et donc d'obtenir des données très précises sur les temps de parcours, les changements de files, *etc.* Cependant il serait impossible d'effectuer une microsimulation à l'échelle de la Belgique.

5.2 Modélisation du trafic routier

5.2.1 Principes de base

Le modèle de trafic est un modèle à 4 étapes (génération des déplacements, distribution des déplacements, choix modal et choix des routes empruntées). Un aspect important de la modélisation concerne la matrice origine-destination des déplacements. En effet, tous les utilisateurs du réseau vont partir d'un point A pour se rendre à un point B, en empruntant 1 ou plusieurs arcs (un arc et l'équivalent d'une portion de voirie). Le choix de l'itinéraire est un choix personnel de gain de temps : l'utilisateur choisira bien souvent l'itinéraire qui optimise son horaire personnel, et pas l'itinéraire optimisant les gains de la collectivité. La matrice de demande a été construite sur base de nombreuses enquêtes et ajustements au cours des 10 dernières années par Stratec, ceci permettant une désagrégation jusqu'au niveau communal. Dès lors, les déplacements intra-communaux ne sont pas pris en compte dans l'analyse. Cette approximation semble toutefois acceptable dans le cadre de cette étude qui concerne les déplacements sur autoroute, déplacements généralement intercommunaux.

La matrice de base est celle du jour ouvrable moyen de laquelle il est possible de déduire celle de l'heure de pointe du matin, de l'heure creuse, de l'heure de nuit ou encore de généraliser à la situation sur l'année.

Enfin, une dernière composante est la contrainte pour chaque arc du réseau : combien de bandes composent ces arcs, quelle est la vitesse maximale autorisée, quelle sera la capacité de ces tronçons, etc...

À l'aide de toutes ces informations, il est possible de calculer différents indicateurs sur l'entièreté du réseau, ou bien les agréger par région, par province, etc. Les indicateurs les plus importants pour la présente étude seront les temps de parcours, la vitesse moyenne, l'accidentalité et les émissions totales de gaz polluants.

5.2.2 Courbe vitesse-débit

Une deuxième notion importante en modélisation est la courbe vitesse débit. En effet, ces deux notions sont intimement liées. Comme expliqué dans la revue de la littérature (cf. diagramme fondamental), une vitesse donnée impose une certaine distance de sécurité entre une voiture et la voiture la précédant. Plus la vitesse augmente, plus la distance de sécurité augmente, bien entendu. Cela entraîne une diminution du nombre de voitures présentes sur la route par unité de distance, car il faut ajouter la distance de sécurité à la taille de la voiture.

Il est possible de traduire cette notion en équation mathématique : c'est la courbe vitesse débit (Figure 27). Nous constatons qu'il existe toujours une vitesse qui optimise le débit de véhicules. Le débit maximal de véhicules s'appelle la capacité.

La Figure 27 illustre les différents leviers permettant d'optimiser la mobilité du réseau. Attention, il s'agit d'équations mathématiques, les courbes au-delà du levier « capacité maximale » sont irréalistes, et on observe dans la réalité à ce moment une diminution de la vitesse et de la capacité (Figure 14).

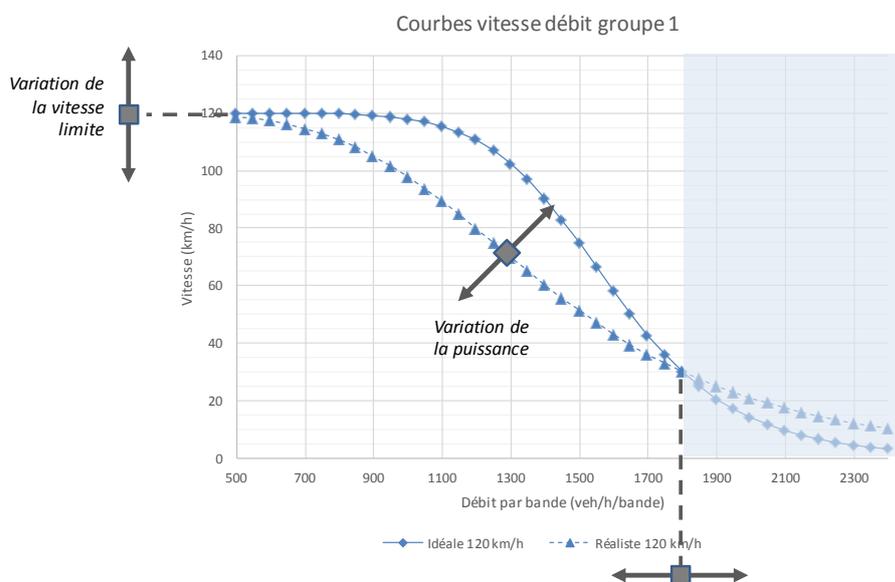


Figure 27: Courbe vitesse-débit d'une bande de circulation sur autoroute. Trois modifications possibles : Vitesse limite, puissance et capacité maximale. La partie grisée n'est pas à prendre en compte. Adapté de Stratec.

Trois leviers sont théoriquement modifiables : le premier est la vitesse limite (= vitesse maximale autorisée). Le deuxième est la capacité par bande (dépendant de l'homogénéité du flux de véhicule). Enfin on note un dernier levier, la puissance de la courbe, qui correspond au comportement des usagers de la route. Plus la puissance est élevée, plus le comportement des conducteurs est idéal (en termes de vitesses homogène et de distance entre véhicule). Comme il est très difficile d'influer sur ce paramètre dans la réalité, ce levier ne sera pas modifié.

5.2.3 Calage et validation d'un modèle

Pour qu'un modèle soit pertinent, il est essentiel qu'il soit une représentation (simplifiée) de la réalité. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer de données de débit de véhicules sur les différents tronçons du réseau.

Pour ce travail, des données provenant des boucles de comptage du VVC (2016) et du centre Perex (2011) ont pu être utilisées. Les données concernant la Wallonie n'ont pu être actualisées dans le modèle mais sont présentée en Figure 6. Toutefois, en accord avec l'expérience de Stratec, il a été estimé que le trafic n'avait pas fondamentalement évolué depuis 2011 ; ces données permettant une estimation suffisante dans le cadre de cette étude. Nous rappelons que l'objectif de ces simulations est de comparer l'effet de différentes mesures sur le réseau routier mais que ces modèles simplifient la situation réelle. Les données liées au nombre d'accidents sont aussi les plus récentes publiées (2015).

5.3 Variables de sortie des modèles utilisés

5.3.1 Mobilité

Pour étudier l'impact de changement de vitesses sur la mobilité, trois indicateurs seront principalement utilisés.

Le premier est la distance totale parcourue par les usagers de la route en 1h. Elle est mesurée en véh.km (véhicules-kilomètres). Cette distance va dépendre du choix du parcours par l'utilisateur pour atteindre sa destination, mais aussi l'importance des congestions, qui font très rapidement chuter les distances parcourues.

Le deuxième indicateur est le temps passé sur le réseau routier (en heures). Cet indicateur sera directement lié aux congestions, les usagers cherchant à minimiser leur temps de parcours.

La vitesse moyenne de tous les usagers sera calculée (en km/h), pour donner une idée globale de la mobilité sur le réseau.

Enfin, pour l'heure de pointe, les longueurs de files seront calculées. N'ayant pas de modélisation individuelle par véhicules, les files sont ici définies comme étant des tronçons où la vitesse moyenne passe sous les 35 km/h. Les longueurs seront donc sensiblement plus élevées que les valeurs communiquées sur par les autorités concernant les embouteillages en heures de pointe. En tous les cas, les gains exprimés en % seraient tout à fait transposables à la longueur des embouteillages.

5.3.2 Sécurité routière

La sécurité routière n'est pas un paramètre simple à étudier lors de modélisations. Dans cette étude, les divers types d'accidents seront étudiés relativement à la proportion de véhicules passant des nationales vers les autoroutes et inversement. Les routes nationales sont en effet plus accidentogènes que les

autoroutes. Le changement de réseau rapporté à la dangerosité de chacun des réseaux permet d'avoir une estimation de l'accidentalité. Les échelles macro et méso du modèle ne permettent pas d'analyser des modifications de comportements individuels. Il ne sera dès lors pas possible d'étudier les accidents liés à l'homogénéité du flux (freinages brusques, changement brutal de file, *etc.*).

5.3.3 Environnement

En ce qui concerne les émissions provenant du réseau (auto)routier, l'impact des différents scénarios a été évalué grâce au logiciel COPERT IV (Ntziachristos *et al.*, 2009). COPERT (Computer Program to calculate Emissions from Road Transport) est une méthodologie européenne permettant le calcul des émissions de polluants du transport routier. Cette méthodologie a été élaborée dans le but d'aider les experts à estimer la pollution causée par le trafic routier dans les inventaires d'émissions nationaux. Développée pour réaliser des inventaires annuels à l'échelle nationale, la méthodologie COPERT peut, sous certaines conditions, être appliquée à des résolutions spatio-temporelles beaucoup plus fines et permettre ainsi d'effectuer des inventaires d'émission à l'échelle d'un tronçon routier.

Ce programme est fondé sur une base de données des fonctions d'émissions pour les différents types de véhicules (et de leur norme EURO), permettant de calculer les émissions de polluants, sur base de paramètres influents (vitesse, température du moteur...).

Les émissions totales du trafic routier se calculent en pondérant les émissions unitaires de chaque classe de véhicule par la part de cette classe dans le trafic considéré. Cette formule permet de tenir compte des variations d'activité dans l'espace et au cours du temps, élément essentiel pour l'étude de scénarios d'émissions.

Les polluants considérés sont les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂), les particules fines (PM), le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂) et les composés organiques volatiles, car ils sont de bons indicateurs des émissions du trafic routier.

5.3.4 Modèle de référence et scénario

A la lumière des observations faites dans les différents pays européens, nous allons tester différentes options pour fluidifier le trafic, améliorer la sécurité routière et diminuer l'impact du transport routier sur l'environnement.

Dû au caractère imprévisible de la météo, il ne sera pas possible de modéliser, en première approche, l'effet d'une modification des vitesses lors de conditions météorologiques défavorables.

Dans une situation normale, où les automobilistes peuvent changer de bandes librement, et ayant une vitesse maximale autorisée de 120 km/h, il est possible sur une autoroute d'atteindre 1800 véhicules par heure et par bande de circulation. Dans les conditions actuelles, les gens changent de bande, ce qui entraîne freinage et ré-accélération : cela induit un flux de véhicules non homogène et donc non idéal. Dans le cœur des embouteillages (durant l'heure de pointe du matin), on observe une vitesse moyenne (mais très hétérogène) de 20 km/h sur le ring de Bruxelles, par exemple. Les freinages et accélérations sont très inefficaces en termes d'émissions de gaz nocifs et de consommation de carburant.

En heure creuse ou de nuit, une proportion des utilisateurs roule au-delà des vitesses maximales autorisées : ce comportement est aussi implémenté dans ce scénario.

Ce scénario sera notre «**Référence**».

5.3.4.1 Scénario 1: augmentation de la vitesse maximale autorisée à 130km/h

Dans ce scénario, la vitesse limite légale passerait à 130 km/h. On peut se demander si cette augmentation doit être générale ou appliquée avec contraintes temporelles ou spatiales (liées notamment aux conditions de trafic ou à l'accidentalité). Afin d'amener des pistes de réponse concernant l'identification des contraintes, nous proposerons une simulation de l'augmentation des vitesses sur l'ensemble des autoroutes

belges, sachant que de toute façon, la saturation de notre réseau entraînera une augmentation réelle des vitesses observées uniquement sur certains tronçons et principalement en heure creuse, voire uniquement de nuit sur la majorité des tronçons.

Ce scénario est dénommé « V_{130} » dans les résultats, en raison de l'augmentation de la vitesse maximale autorisée.

5.3.4.2 Scénario 2 : diminution des vitesses autorisées dans des conditions de trafic intenses

Dans ce scénario, la vitesse maximale autorisée reste à 120km/h. Il est ensuite imaginé que les autoroutes puissent être équipées de gestion dynamique du trafic en temps réel. En cas de trafic dense, des signaux lumineux contraindraient à passer à 90 km/h, puis 70 km/h, jusqu'à atteindre 30 km/h pour la vitesse à capacité (réseau saturé). Cette vitesse atteint actuellement 20 km/h en raison des phénomènes de conduite en accordéon provoqués par les changements de bande, les différentiels de vitesse et les insertions menant à des pertes de capacité. L'introduction d'un contrôle de vitesse variable devrait engendrer un flux de véhicules mieux contrôlés, plus homogène et permettre donc d'augmenter la vitesse à capacité de la route considérée. De plus, une vitesse homogène induit une diminution de la consommation et donc des gaz émis. Enfin, cela induit une meilleure sécurité car moins d'interaction avec les autres usagers.

Ce scénario est dénommé « V_{dim} » dans les résultats, faisant référence à la diminution progressive de la vitesse autorisée.

5.3.4.3 Scénario 3: optimisation de la vitesse à capacité et de la capacité sur autoroute

Dans ce dernier scénario, le scénario V_{dim} va être optimisé. Pour être optimal, le scénario V_{dim} devrait s'accompagner d'une interdiction de changer de bandes (sauf à l'insertion et à la sortie de l'autoroute). La capacité par bande de circulation attendue par l'introduction de cette mesure est estimée à 2000 véhicules par heure (1800 en temps normal). En disciplinant les usagers de la route de la sorte, cela permettra peut-être un gain collectif.

Ce scénario est dénommé « V_{opt} » dans les résultats, car la capacité et la vitesse à capacité sont toutes les deux **optimisées**.

5.4 Limitations des simulations

Le lecteur est invité à garder à l'esprit que, par définition, les simulations effectuées restent une représentation de la réalité, et non la réalité elle-même. Elles prennent en compte le trafic de 2016 et les tendances actuelles en matière de déplacement.

Les résultats observés dans ces simulations ne pourront sans doute pas être obtenus à l'identique sur le réseau autoroutier belge. Néanmoins, ils permettent de faire des bilans et de montrer les grandes tendances qu'il serait impossible de prédire par ailleurs, tant le nombre de facteurs intervenant est important.

5.5 Résultats des simulations

Les résultats des simulations seront synthétisés dans les sections qui suivent et seront comparés aux données de références (état actuel du réseau). Chacun des thèmes (mobilité, accidentalité et environnement) sera étudié en heures de pointe, en heures creuse et heures durant la nuit. Les heures de pointe sont définies entre 7h et 9h le matin. La nuit est définie de 22h à 6h.

5.5.1 Mobilité

5.5.1.1 Heure de pointe

Les problèmes de mobilité se marquent évidemment principalement en heure de pointe, c'est donc durant ces périodes qu'il faut essayer au maximum d'améliorer le flux de trafic.

En effet, les congestions structurelles sont une fatalité quotidienne, dans les centres-villes mais aussi sur les autoroutes, comme le montre la Figure 28 A. La congestion est très importante sur les axes d'entrée de Bruxelles mais également sur les tronçons (A1 et A12) reliant Anvers à Bruxelles.

De plus, durant les heures de pointe, peu de segments autoroutiers permettent encore de rouler à plus de 110 km/h. Il s'agit principalement d'autoroutes wallonnes situées en province du Luxembourg (A4 et A26). En Flandre, le réseau est fortement congestionné ; l'A18 (reliant Jabbeke à Adinkerke) n'apparaît toutefois pas affectée.

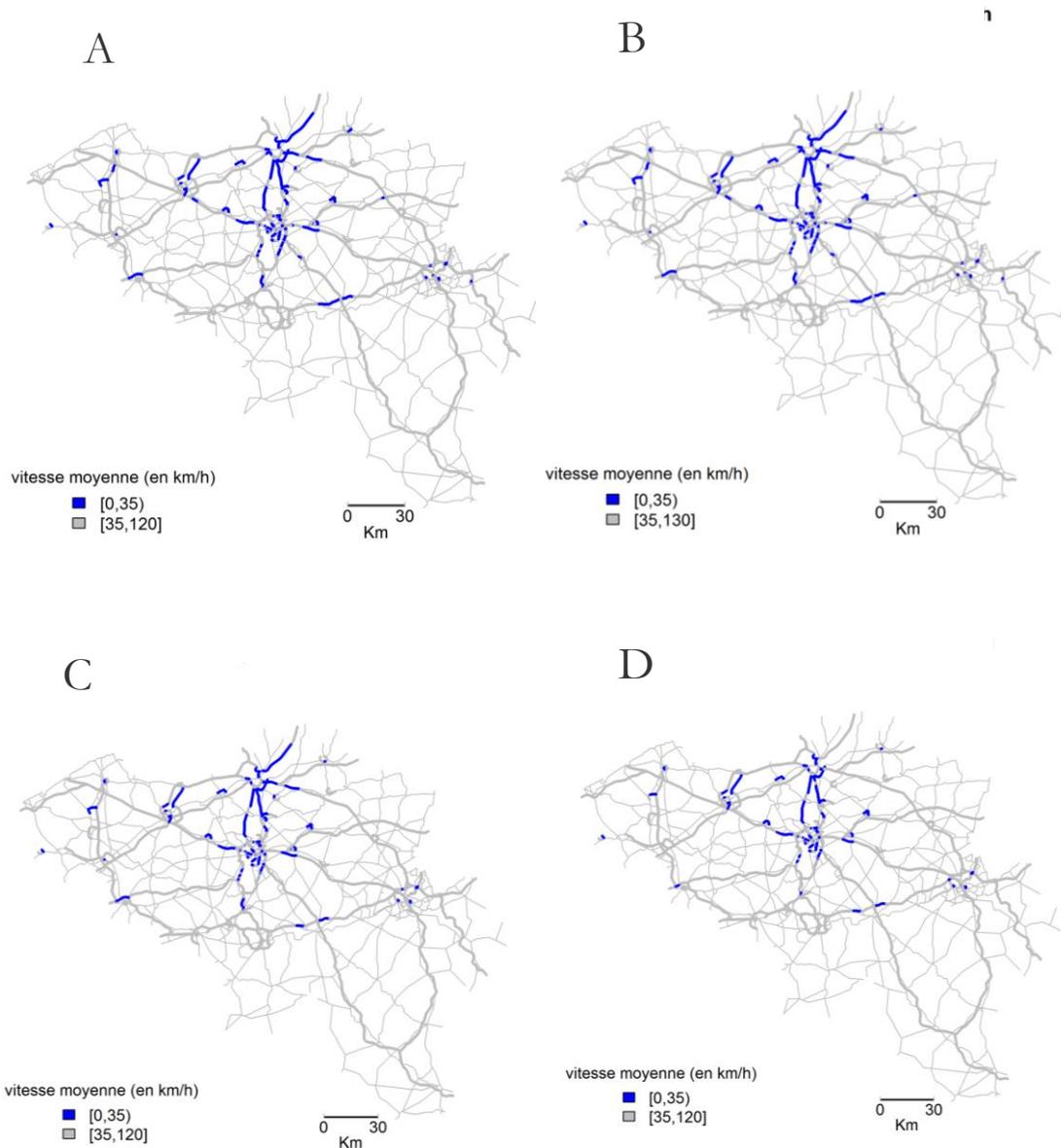


Figure 28: Vitesses moyennes observées sur le réseau belge < 35 km/h en fonction des 3 scénarios. A : Situation de référence, B : Augmentation de la vitesse limites à 130 km/h, C : diminution dynamique de vitesse en fonction du trafic, D : diminution dynamique de vitesse et homogénéisation du trafic

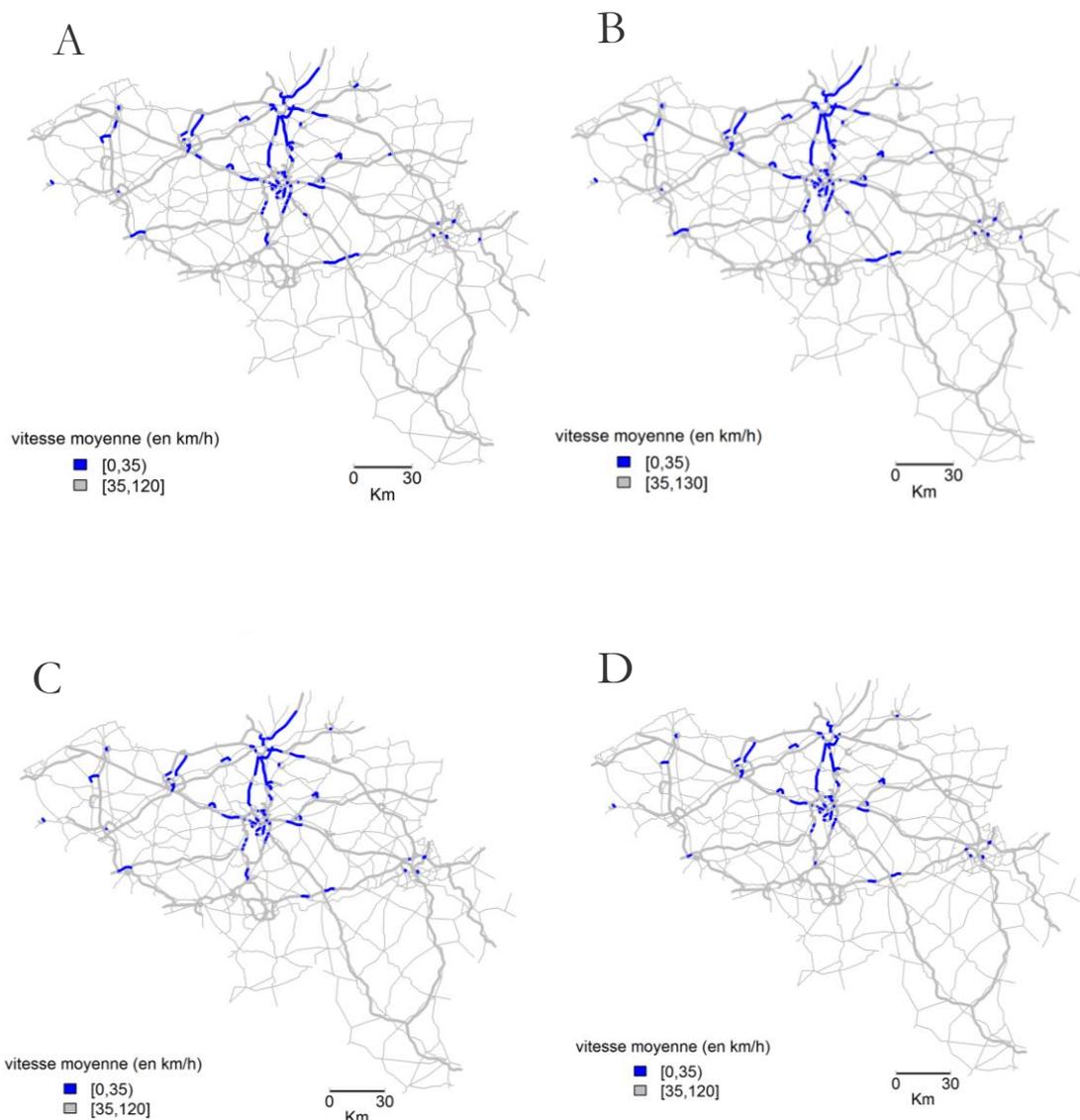


Figure 29: Vitesses moyennes modélisées sur le réseau belge < 35 km/h en fonction des 3 scénarios. A : Situation de référence, B : Augmentation de la vitesse limites à 130 km/h ,C : diminution dynamique de vitesse en fonction du trafic , D : diminution dynamique de vitesse et homogénéisation du trafic

L'introduction d'une diminution progressive des vitesses limites fournit des résultats intéressants, sans modifier la vitesse libre maximale de 120 km/h. On passe d'une vitesse moyenne pour tous les véhicules de 43,6 km/h à une vitesse moyenne de 51,6 km/h (Tableau 9). Ce résultat est encore amélioré pour une capacité passant de 1800 evp/h à 2000 evp/h (scénario V_{opt}), rappelons que cette augmentation est atteinte par un contrôle de la turbulence du flux (moins de freinage brusques, limitations des changements de bande). On atteint alors une vitesse moyenne sur le réseau de 57 km/h.

La distance totale parcourue pour arriver à destination diminue pour V_{dim} et V_{opt} , ce qui signifie que le choix du trajet change et devient plus judicieux par rapport à la destination.

Tableau 9: Comparaison des indicateurs de mobilités pour les différentes simulations effectuées, en une heure de pointe

	REF	V ₁₃₀	V _{dim}	V _{opt}
Distance totale parcourue (en véh. km)	89.537.936	89.742.192 (+0.2%)	88.383.184 (-1%)	88.383.184 (-1.3%)
Temps passé sur le réseau (en h)	2.055.144	2.041.859 (-0.6%)	1.551.958 (-16.5%)	1.551.958 (-24.5%)
Vitesse moyenne (km/h)	43.6	44.0 (+1%)	51.6 (+18%)	56.9 (+30%)
Longueur des tronçons roulant à – de 35km/h (km)	610	610 (0%)	550 (-10%)	420 (-30%)

Le changement de vitesse à capacité (scénario V_{dim}) permet également de réduire significativement le temps total parcouru sur le réseau non-saturé. Étant donné qu'il y a moins de congestion, il y a également moins de détours des conducteurs qui favorisaient un itinéraire alternatif.

L'impact d'une augmentation de la vitesse maximale autorisée sur le réseau belge ne semble n'avoir que peu d'effets sur les performances du réseau en heure de pointe. Ainsi, cette augmentation, ne devrait pas mener à l'amélioration de la vitesse moyenne des Belges (1% de variation, Tableau 9).

Comme illustré à la Figure 28 B, une augmentation de la vitesse libre n'aura quasi pas d'impact sur les files structurelles observées sur le réseau belge en heures de pointe. C'est principalement l'augmentation de la capacité qui favorisera la réduction des files.

Si une amélioration du flux est couplée aux diminutions progressives de vitesses (modèle V_{opt}), les gains en termes de vitesse moyenne, temps de parcours et km parcourus sont encore plus conséquents. Il s'agit ici en effet d'une augmentation globale de l'efficacité de notre système autoroutier.

On note aussi une belle diminution de la longueur des files pour les scénarios V_{dim} et V_{opt}, de 10 et 30 %, respectivement.

Un effet bénéfique collatéral d'une amélioration des performances autoroutières est un glissement du trafic des nationales vers les autoroutes (Figure 30). Ceci se marque principalement pour le V_{opt}, avec un transfert des poids lourds et les véhicule légers vers les autoroutes. Cela entraînerait une amélioration de la mobilité sur les routes nationales.

Tableau 10: shift du trafic des nationales vers les autoroutes, en fonction du scénario considéré.

Scénario	Report du trafic des nationales vers les autoroutes (% du trafic total, par rapport à la référence)
V ₁₃₀	+0,5% (+17.500 véh.km)
V _{dim}	+3,1% (+87.500 véh.km)
V _{opt}	+7% (+202.500 véh.km)

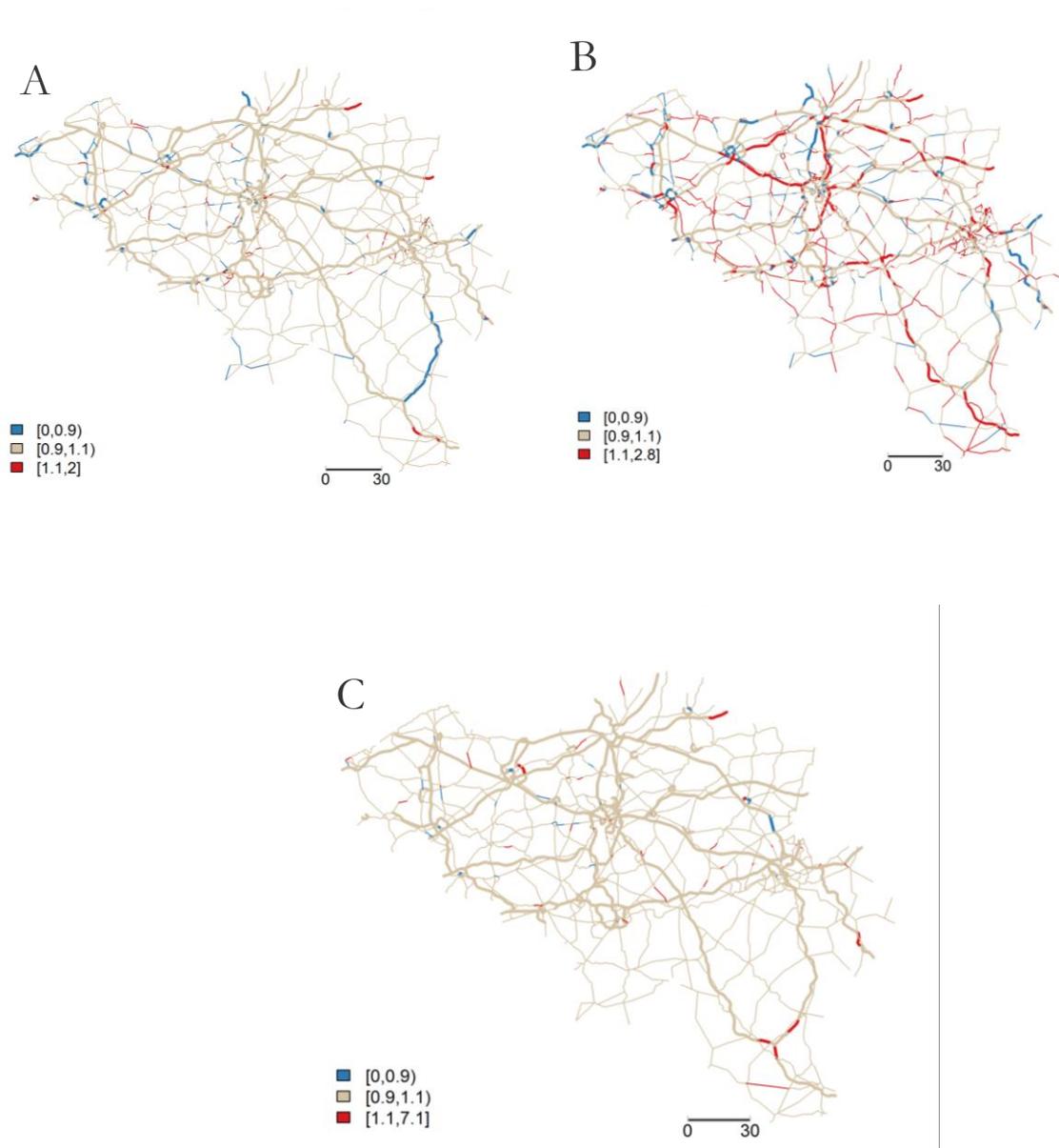


Figure 30: Modification du ratio de trafic autoroute/ route nationale par rapport à la référence. A : Scénario V_{dim} ; B : scénario V_{opt}, C : scénario V₁₃₀. Un ratio de 0.9 veut dire une diminution du trafic de 10% ; un ratio de 1.1 veut dire une augmentation du trafic de 10%.

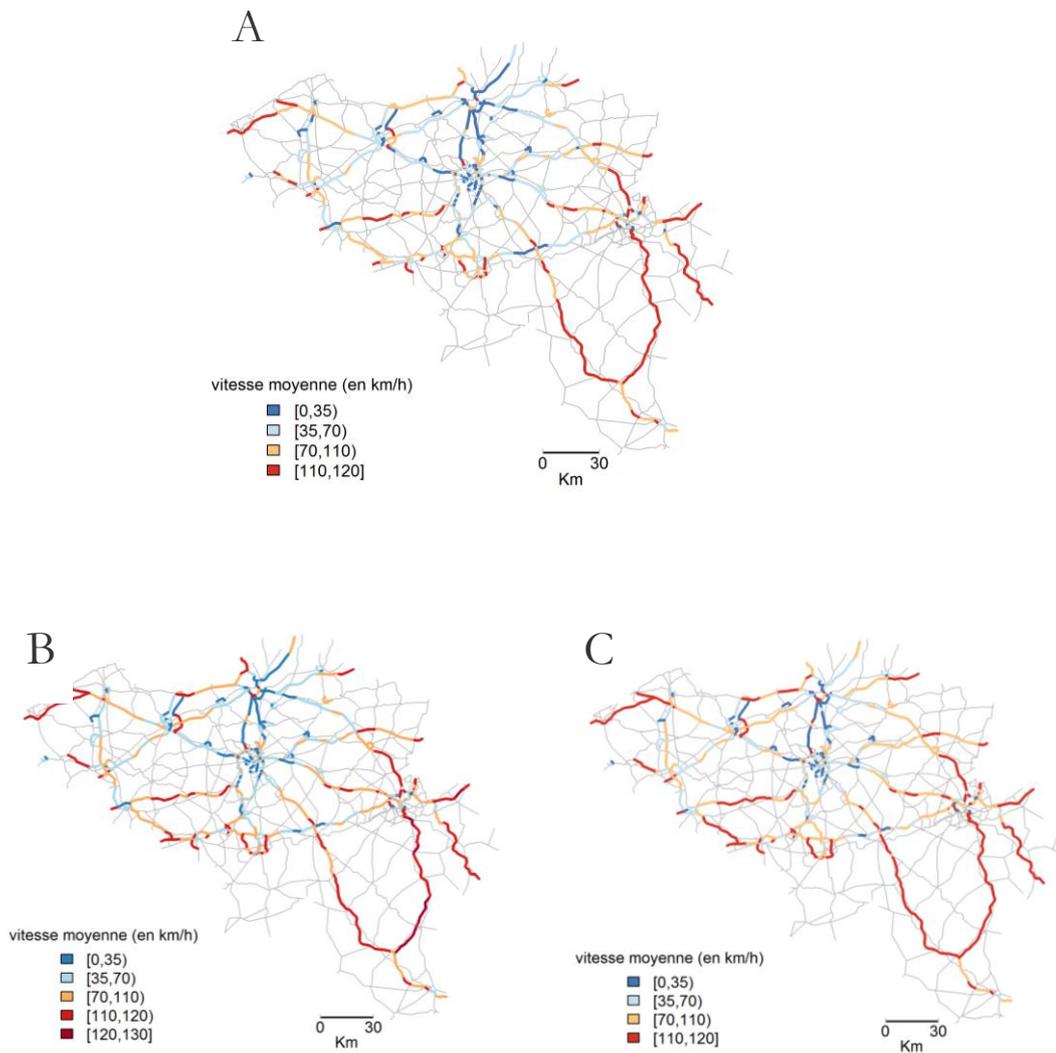


Figure 31: Évolution des vitesses moyennes en fonction des différents scénarios. A : référence ; B : scénario V_{130} ; C : scénario V_{opt} .

La Figure 31 présente les vitesses moyennes sur le réseau en fonction des différents scénarios possibles. On constate un contraste important en fonction des régions du pays. Le nord est marqué par des vitesses moyennes très faibles (35 km/h) et le sud quant à lui voit ses vitesses supérieures à 110 km/h sur certains tronçons. Les scénarios V_{dim} et V_{opt} permettent clairement d'augmenter la vitesse moyenne sur autoroute (Tableau 9). Dans tous les cas de figure, on a un report d'une partie du trafic des nationales vers les autoroutes.

5.5.1.2 Heures creuses / heures de nuit

Les scénarios concernant les heures creuses et de nuit n'apportent pas de changements significatifs sur la mobilité. En effet la limitation dynamique de vitesse ne prend lieu que lorsque la circulation arrive à saturation. Ils ne seront donc pas détaillés ici.

On notera simplement que le scénario V_{130} apporte de nuit un gain de temps, en moyenne, de 2 %, mais sur une densité de trafic très faible (Tableau 11). En effet, le temps passé sur le réseau est ici estimé à 163 000 heures, alors qu'il dépasse les 2 000 000 d'heures en heure de pointe. La vitesse moyenne observée est bien entendu plus élevée, et atteint 113,8 km/h.

Tableau 11: Comparaison des indicateurs de mobilité pour les différentes simulations effectuées, en une heure de nuit

	REF	V ₁₃₀	V _{dim}	V _{opt}
Distance totale parcourue (véh. km)	15.584.262	15.617.087 (+0.2%)	15.584.236 (+0%)	15.584.229 (+0%)
Temps passé sur le réseau (en h)	162.904	159.606 (-2%)	162.694 (-0.1%)	162.543 (-0.2%)
Vitesse moyenne (km/h)	108,9	113,8 (+4.5%)	109,1 (+0.2%)	109,2 (+0.3%)

5.5.2 Sécurité routière

5.5.2.1 Heure de pointe

Tableau 12: Évolution de l'accidentalité en heure de pointe en fonction des différents scénarios

Évolution par rapport à la référence	V ₁₃₀	V _{dim}	V _{opt}
Accidents	0%	-2%	-3%
Tués	0%	-3%	-6%
Blessés graves	0%	-3%	-4%
Blessés légers	0%	-1%	0%

En heure de pointe, l'autoroute devenant plus attractive dans les scénarios V_{dim} et V_{opt}, on observe un glissement du trafic voiture mais aussi camions des nationales vers les autoroutes (Figure 30). Ce qui signifie que les accidents diminuent sur les nationales, cela entraîne une amélioration globale de la sécurité routière. Il n'existe pas d'effet (positif ou négatif) du scénario V₁₃₀ en heure de pointe : en effet, très peu d'usagers auront l'occasion de rouler à 130 km/h en heure de pointe. Donc, même si le risque augmente avec la vitesse, les effets sont ici négligeables.

Ce report est positif pour la sécurité routière. Pour rappel, les décès sont pour 53% issus d'accidents hors agglomération. Diminuer le trafic sur ces routes au profit des autoroutes pourrait dès lors favoriser une diminution des accidents sur ces routes. Il faudra cependant bien contrôler la vitesse sur ces routes afin que le trafic réduit n'entraîne pas une vitesse (trop) importante et donc un risque d'accident accru.

5.5.2.2 Heure creuse

En heure creuse également, la modification de la vitesse à capacité et de la capacité fournit une amélioration substantielle du risque potentiel d'accidents (particulièrement d'accidents graves ; Tableau 13) pour les scénarios V_{dim} et V_{opt} .

Concernant le scénario V_{130} , le nombre d'accidents ne semble pas varier par rapport à la référence, car en réalité il y a de nouveau très peu de zones en heures creuses où il est possible de rouler au-delà de 120 km/h.

Tableau 13: Évolution de l'accidentalité en heure creuse en fonction des différents scénarios

Évolution par rapport à la référence	V_{130}	V_{dim}	V_{opt}
Accidents	0.1%	-1.0%	-1.8%
Tués	-0.1%	-2.6%	-4.9%
Blessés graves	0.0%	-1.7%	-3.1%
Blessés légers	0.2%	0.0%	0.1%

5.5.2.3 Heure de nuit

En heure de nuit, l'augmentation de la limitation de vitesse semble être intéressante (scénario V_{130}) car plus d'utilisateurs emploient les autoroutes (qui sont moins accidentogènes) étant donné la réduction du temps de parcours. Cependant ce gain est très limité (-1% maximum). Les scénarios V_{dim} et V_{opt} n'ont aucun impact sur l'accidentalité, car en effet la plupart du réseau autorise des vitesses libres (non congestionnées) durant la nuit.

Tableau 14: Évolution de l'accidentalité en heure de nuit en fonction des différents scénarios

Évolution par rapport à la référence	V_{130}	V_{dim}	V_{opt}
Accidents	0.0%	0.0%	0.0%
Tués	-0.8%	0.0%	0.0%
Blessés graves	-0.2%	0.0%	0.0%
Blessés légers	0.2%	0.0%	0.0%

Néanmoins, il faut faire attention à la réaction des utilisateurs, qui ont tendance à rouler plus vite que la limitation de vitesse, surtout la nuit. De plus, si la proportion d'accident diminue (lié au shift national--> autoroutes), il ne faut pas oublier que le risque et la gravité des accidents, eux, augmentent substantiellement avec la vitesse (power model). Le faible gain illustré ici pour V_{130} est donc à prendre avec précaution ici.

5.5.3 Environnement

À l'heure actuelle, il est émis chaque année des millions de tonnes de gaz nocifs ou à effet de serre sur le réseau routier et autoroutier belge. L'objectif défini par la COP21 est de diminuer de 40 % la production de ces gaz à l'horizon 2020 (par rapport à 1990 ; Robbins, 2016).

Dans ce contexte, les effets de ce scénario sont bénéfiques en cascade : en effet, la diminution de la distance totale parcourue en conjonction avec la vitesse moyenne plus élevée entraîne une diminution très importante des émissions de gaz à effet de serres et des gaz nocifs.

5.5.3.1 Heure de pointe

En heure de pointe, les gains en termes d'émissions pour les scénarios V_{dim} et V_{opt} sont intéressants (Tableau 15). En effet, on observe une diminution des émissions de 19% composés volatiles organiques (COV) ainsi que des diminutions de CO et CO_2 (8 et 3%, respectivement). Contrairement aux deux précédents, le scénario V_{130} , prévoyant une augmentation de la limitation de vitesse à 130km/h, a des effets néfastes, même aux heures de pointes : augmentation de 5% du CO et 3% des particules fines.

Tableau 15: Comparaison de la production des différents gaz et consommation selon COPPERT en fonction des différents scénarios.

	CO ₂	CO	COV	NO _x	PM ₁₀	Carburant
	(g/véh-km)	(g/véh-km)	(g/véh-km)	(g/véh-km)	(g/véh-km)	(l/100 véh-km)
REF	20230731.1	74531.3013	15789.2385	43475.1165	1796.90763	7844699.207
REF- V₁₃₀	1%	5%	1%	1%	3%	1%
REF- V_{dim}	-3%	-8%	-13%	-6%	-6%	-3%
REF- V_{opt}	-3%	-9%	-19%	-7%	-7%	-3%

5.5.3.2 Heure creuse

Hors heure de pointe, les scénarios V_{dim} et V_{opt} restent tout à fait bénéfiques pour l'environnement (Tableau 16). En effet, l'homogénéisation du trafic permet, aux endroits restant congestionnés, de gagner jusqu'à 14% d'émission de composés organiques volatiles et une diminution de 3% des émissions de particules fines.

Le scénario V_{130} , quant à lui, induit une augmentation substantielle des émissions nocives avec +6% de CO, +3% de particules fines, ainsi qu'une augmentation globale de consommation de 2%.

Tableau 16: Comparaison des émissions de gaz polluants en heure creuse en fonction des différents scénarios testés

	CO ₂	CO	COV	NO _x	PM ₁₀	Carburant
	(g/véh-km)	(g/véh-km)	(g/véh-km)	(g/véh-km)	(g/véh-km)	(l/100 véh-km)
REF	18139610.3	60435.4081	14841.8402	42798.2627	1679.97376	6979280.076
REF- V₁₃₀	1%	6%	1%	1%	3%	2%
REF- V_{dim}	-1%	-3%	-9%	-2%	-3%	-1%
REF- V_{opt}	0%	-2%	-14%	-3%	-3%	0%

5.5.3.3 Heure de nuit

De nuit le trafic faible induit une vitesse libre assez importante. Ce qui conduit, pour le scénario V_{130} , à un effet très négatif sur la production de gaz nocifs (Tableau 17) : +15% de CO, +8% de particules et + 4% de CO₂. On note une augmentation globale de consommation de 4%.

Dans ces conditions, les scénarios V_{dim} et V_{opt} n'ont presque aucun impact (positif ou négatif) sur les émissions de gaz polluants.

Tableau 17: Comparaison des émissions de gaz polluants durant la nuit en fonction des différents scénarios testés

	CO ₂	CO	COV	NO _x	PM ₁₀	Carburant
	(g/véh-km)	(g/véh-km)	(g/véh-km)	(g/véh-km)	(g/véh-km)	(l/100 véh-km)
REF	4203704.32	15081.1394	2259.86602	9781.26776	387.704184	1614765.429
REF- V_{130}	4%	15%	2%	3%	8%	4%
REF- V_{dim}	0%	0%	0%	0%	0%	0%
REF- V_{opt}	0%	1%	0%	0%	0%	0%

5.6 Synthèse des modélisations

Les simulations effectuées dans le chapitre précédent tentent de montrer qu'une modification dynamique des limitations de vitesse en Belgique peut avoir un impact important sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement. En effet, toutes les simulations entraînent des modifications significatives en termes de temps de parcours, d'émission de gaz à effet nocifs et en modification de la probabilité d'accidents.

Tableau 18: Synthèse des résultats des différentes modélisations. Les pourcentages sont calculés par rapport à la référence. ↓ signifie une diminution importante, (↓) signifie tendance à la diminution, ↔ signifie sans effet, (↑) signifie tendance à l'augmentation, ↑ signifie augmentation importante, / signifie pas étudié.

Scénario	Heure simulée	Mobilité	Sécurité routière	Environnement
V ₁₃₀	Heure de pointe	↔	↔	(↑) émissions
	Heure Creuse	/	↔	(↑) émissions
	Heure de nuit	(↓) temps de parcours (↑) vitesse moyenne	↑ accidents, tués et blessés sur autoroute (↓) accidents, tués et blessés possibles sur autres routes	↑ émissions
V _{dim}	Heure de pointe	↓ temps de parcours ↑ vitesse moyenne	↓ accidents, tués et blessés	↓ émissions
	Heure Creuse	/	(↓) accidents, tués et blessés	↓ émissions
	Heure de nuit	↔	↔	↔
V _{opt}	Heure de pointe	↓ temps de parcours ↑ vitesse moyenne	↓ accidents, tués et blessés	↓ des émissions
	Heure Creuse	/	↓ accidents, tués et blessés	↓ des émissions
	Heure de nuit	↔	↔	↔

Les simulations sont synthétisées dans le Tableau 18. Ils établissent un état des lieux compte tenu du trafic actuel et des comportements actuels des Belges.

Le scénario d'une augmentation de vitesse sous certaines conditions, de nuit par exemple, s'il diminue légèrement le temps de parcours, entraîne une augmentation des émissions polluantes (+15% de monoxyde de carbone). Mais ce gain de temps se fait sur un nombre d'utilisateur assez faible (trafic très fluide la nuit). Les bénéfices d'une telle augmentation semblent donc faibles.

Le deuxième scénario, V_{dim}, impliquait une diminution des vitesses limites dynamique en réponse à la densification du trafic. Ses effets se marquent principalement en heure de pointe, bien entendu, mais aussi en heure creuse, car le réseau reste saturé en bon nombre de tronçons sur le réseau belge. On a noté une diminution importante du temps de parcours (-16%), grâce à l'harmonisation des comportements ce qui se traduit par une vitesse moyenne passant de 44 à 51 km/h. Cette harmonisation du flux de véhicules entraîne aussi une diminution des émissions des gaz à effet de serre et des gaz nocifs. Enfin, rendant l'autoroute plus attractive (temps de parcours réduit), on observe un glissement du trafic des nationales vers les autoroutes.

En optimisant cette hypothèse de diminution dynamique de vitesse, et en augmentant la capacité des autoroutes (scénario V_{opt}), ces résultats sont exacerbés, atteignant 56 km/h de vitesse moyenne globale, des diminutions de 20% des composés organiques volatiles et une diminution de 6% des tués.

Il semble donc que cette étude mette en évidence des avantages certains d'une diminution dynamique des vitesses sur autoroute : diminution des temps de parcours, diminution des accidents graves et diminution des émissions nocives pour l'environnement. Bien entendu il sera intéressant d'analyser ces résultats région par région, ainsi que de tester d'autres modifications de vitesse. Il ne faudra pas non plus oublier que si les trajets sur autoroute deviennent plus attractifs, des gens ne prenant pas la voiture pour le moment se décideront peut-être, à nouveau, à reprendre la voiture pour leurs déplacements. Cela entraînerait une augmentation du trafic de manière globale, et donc une diminution des bénéfices illustrés ici. Néanmoins les scénarios montrent que la modification de vitesse a un impact important pour la société belge. Il serait intéressant dans une future étude d'en étudier les gains économiques.

6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 La Belgique dans le contexte européen

En Belgique, la limitation de vitesse sur autoroute a été établie à 120 km/h il y a plus de 40 ans (1972). Depuis le paysage en termes de mobilité, de sécurité et d'environnement a subi de profonds changements. Remise dans le contexte européen, la limitation de vitesse à 120 km/h est inférieure à celle des pays voisins. Elle atteint en effet 130 km/h en France, en Allemagne, au Luxembourg et au Pays-Bas. En revanche, les pays scandinaves ont une limitation de vitesse plus basse (100 km/h). La Grande Bretagne, elle aussi, dispose de limitations de vitesse plus faibles d'environ 112 km/h.

En matière de modulation de cette vitesse limite, on observe en Belgique déjà des applications liées au management trafic (p.ex. 100 km/h sur le ring d'Anvers) ou liées aux pics de pollution (alerte SMOG en Wallonie et en Flandre). Bien d'autres pays Européens appliquent quant à eux des variations de vitesse liées au trafic (Royaume-Uni, Pays-Bas, Autriche, ..), liées aux conditions météorologiques (110 km/h en France en cas de précipitations diminution dynamique de la vitesse en Autriche en cas de pluies, de gel et /ou de neige, et plus récemment pour la limitation de pollution) ou alors dans des zones dangereuses (en Allemagne, par exemple). On constate donc que ces technologies semblent s'implanter dans tout le paysage européen.

L'accidentalité sur nos autoroutes n'est pas un exemple en Europe. En effet, malgré une vitesse limite généralement plus faible en Belgique, on constate que l'accidentalité est assez élevée. Cependant, on constate aussi que la densité de trafic au regard de la taille du réseau est elle aussi très élevée par rapport aux pays voisins. La vitesse limite ne semble donc pas être corrélée avec l'accidentalité.

6.2 La vitesse dans la sécurité routière, l'environnement et la mobilité

La revue de la littérature a permis de mettre en évidence les effets de la vitesse et de la variation des vitesses sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement. Elle a aussi permis de montrer que ces 3 aspects sont impactés par la vitesse des véhicules sur autoroute.

De manière générale, on a pu voir qu'une augmentation de la vitesse des véhicules sur autoroute augmente la consommation de carburant (la limitation à 120 km/h avait été créée spécifiquement pour limiter la consommation de carburant lors du premier choc pétrolier), les émissions de gaz polluants et de gaz à effet de serre, et la gravité des accidents. Mais cette constatation est à mettre en relation avec un effet positif : la diminution des temps de parcours. Néanmoins, en Belgique, ces gains de temps resteraient très limités pour un passage de 120 à 130 km/h vu la faible taille du pays.

Il est difficile d'étudier les effets d'une augmentation de la limitation vitesse sur le terrain. En Allemagne, par exemple, il existe des zones sans limitation légale de vitesse. Cependant ces zones sont disposées à des endroits présentant des risques limités pour la sécurité routière, tandis que l'on met des limitations de vitesse dans les zones plus dangereuses. Lorsque l'on tente de comparer l'accidentalité de ces zones, il existe un biais inévitable et les zones sans limitation semblent plus sécuritaires que les zones à limitation. La situation allemande ne semble donc, dans ce contexte, pas un bon terrain d'investigation d'une augmentation de la limitation de vitesse. Il semblerait intéressant d'investiguer plus en détail les essais réalisés au Pays Bas et au Danemark, ces deux pays ayant modifiés leur limitations de vitesse de 120 à 130 km/h. Cependant la faible proportion d'accidents ayant lieu sur autoroute rend les comparaisons assez compliquées.

Un autre facteur important est la variation de vitesse entre les usagers de la route. En effet, un flux hétérogène entraîne une diminution de la capacité du réseau autoroutier, une augmentation du risque d'accident et une augmentation des émissions de gaz polluants. En effet, les accélérations et freinages répétés sont une source de diminution de la vitesse globale du flux, augmente la distance entre les usagers et consomment de l'énergie inutilement. Enfin, ces variations de vitesse entre usagers sont une source d'accidents potentiels, puisque elles augmentent les interactions possibles entre les véhicules circulant sur le réseau.

6.3 Infrastructure nécessaires à la modification dynamique de la limitation de vitesse

Bien entendu, une implémentation de limitations de vitesse dynamique sur le réseau autoroutier belge suppose aussi l'implémentation des différentes technologies nécessaires à l'utilisation de celles-ci.

Tout d'abord, il est essentiel d'avoir une estimation en temps réel de la densité de trafic sur le réseau. Cela peut se faire par des boucles de comptage, aussi appelées « inductive loops », situées sous chaque bande de circulation et à intervalles réguliers, pas traitement d'images caméra, etc. Reliées à des algorithmes de modélisation du trafic, ces technologies peuvent quantifier et prédire l'état du trafic routier et ensuite envoyer des directives pour l'optimisation de celui-ci (ouverture d'une bande, limitation de vitesse, etc.).

Ce type de management des limitations de vitesse est déjà présent sur certains tronçons en Belgique. Si les Régions décidaient d'étendre ces techniques, il faudrait donc généraliser les technologies nécessaires. Fort heureusement, la volonté d'une modernisation de nos systèmes semble être présente chez les différentes instances compétentes : le VVC en Flandre et le centre PEREX en Wallonie sont en train de moderniser leurs infrastructures et leur mode de fonctionnement. Ils disposent déjà d'un nombre important de boucles de comptage partout sur le réseau autoroutier belge, permettant de monitorer le trafic en temps réel. Ils disposent aussi de caméras ANPR nécessaires à la mise en place du télépéage pour les poids lourds traversant le réseau autoroutier belge. La Wallonie veut par ailleurs augmenter sa densité de caméras dans un avenir proche. Enfin, des panneaux lumineux existent déjà, mais leur densité semble actuellement trop faible que pour passer à la limitation de vitesses dynamique. Les systèmes déjà disponibles en Belgique semblent être une excellente base pour l'extension des systèmes de vitesse dynamique.

Si le réseau autoroutier belge est comparé au réseau autoroutier de pays ayant opté pour les vitesses dynamiques, la transition ne semble pas démesurée. Si on prend l'exemple de l'Autriche, pays qui semble être à la pointe en matière de monitoring du trafic et en matière d'application de vitesse dynamique, on constate des données réseaux très proches de la Belgique. En effet, la Belgique compte 1763 km d'autoroutes, tout à fait comparable aux 2000 km de l'Autriche. En km par habitant, les chiffres sont eux aussi très proches, de l'ordre de 14 km pour 1000 habitants.

Enfin, pour que ces systèmes soient efficaces, il semble important de discipliner au maximum les usagers de ces réseaux autoroutiers. En augmentant le nombre de caméras ANPR, il serait facile de les utiliser aussi comme radar tronçons, afin de s'assurer que l'utilisateur roule à la vitesse recommandée.

Pour que ces vitesses soient acceptées, il faudrait qu'elles soient explicitées au maximum, claires et non ambiguës. En effet, actuellement, il n'existe qu'une seule vitesse limite : 120km/h pour les véhicules dont la masse est inférieure à 3,5 t, et 90 km/h pour les plus lourds. Il est donc facile pour les usagers de connaître la vitesse limite. Dans un contexte de limitations de vitesse variables, il faut que les nouvelles vitesses soient à la fois bien visibles et bien suivies. Au Pays-Bas, l'initiative ZOO¹⁵ a pour objectif d'utiliser les smartphones des usagers pour partager les limitations de vitesse à employer, afin d'harmoniser les comportements sur la route.

Dans ce contexte, les avancées en matière de véhicules connectés permettront sans doute de nouvelles solutions afin de communiquer en temps réel la vitesse limite aux usagers de la route. Enfin, mais si elles sont encore à l'aube de leur existence, l'arrivée des véhicules autonomes dans notre parc automobile pourrait grandement contribuer à homogénéiser le flux de trafic (en termes de vitesses pratiquées), et pourrait être une solution valable face aux problèmes de congestion rencontrés en Belgique (sans compter les améliorations du point de vue environnemental et de sécurité routière).

6.4 Effets des modifications des vitesses en Belgique

En admettant que les systèmes technologiques puissent être implémentés, les simulations ont mis en évidence que les modifications de la vitesse autorisée avaient un impact significatif sur la sécurité routière, la mobilité et l'environnement.

¹⁵ <http://www.zoof.nu/>

Il est évident que les résultats des simulations sont des résultats « idéaux », basé sur des comportements parfaits qu'il ne sera sans doute jamais possible d'atteindre à l'identique. Néanmoins, il fixe une ligne directrice, ainsi que les tendances vers lesquelles de tels changements en matière de limitation de vitesse pourraient amener. Même si les objectifs liés à ces résultats de modélisation ne sont atteints qu'à 50%, il est évident que ce sera déjà un gain important pour notre société.

Les modélisations sont synthétisées dans le Tableau 18. Les résultats mettent en évidence que la diminution progressive de la limitation de vitesse et l'homogénéisation du flux sont les mesures qui apporteraient le plus d'avantages. En effet, ces résultats sont conformes avec la littérature : en régulant la vitesse et le flux de véhicules, on homogénéise le trafic ce qui retarde globalement l'apparition de bouchon. De plus la longueur totale des files semble diminuer substantiellement. C'est bien entendu aussi bénéfique pour la sécurité routière. En effet, la littérature nous apprend qu'un facteur déterminant dans la sécurité n'est pas la vitesse, mais l'hétérogénéité des vitesses entre les usagers de la route. Ces inégalités créent des interactions entre les véhicules : freinage, changement de bande, évitement, etc. Ces comportements peuvent entraîner des accidents. L'interdiction de changement de file est une solution, drastique certes, mais qui permet de limiter très fortement les interactions entre les usagers. Elle permet de créer un flux de véhicules régulier, avec des distances de sécurité régulières et une homogénéité du trafic optimale. Afin d'obtenir une efficacité maximale, il serait aussi intéressant de prévoir, partout où cela est possible, une directionnalité des bandes bien en amont des échangeurs : cela permettrait à nouveau d'organiser le flux de véhicule au maximum.

Suite à ces modifications de comportements sur autoroute, et à un meilleur flux, l'autoroute semblerait devenir plus attractive. En effet, les simulations tendent à montrer que les flux de camions et véhicules légers utiliseraient préférentiellement les autoroutes plutôt que sur le réseau secondaire. Le gain de temps semble significatif (Mais à long terme, la demande pourrait augmenter et modifier ce bilan). Cette redirection du flux est intéressante car elle permettrait un trafic moins dense sur les routes nationales. Or, le Tableau 2 montrent que les réseaux secondaires sont les plus accidentogènes. On pourrait s'attendre à une diminution du nombre et de la gravité des accidents grâce sur le réseau secondaire grâce au report sur les autoroutes. L'impression de sécurité pour les populations précédemment traversées par ces flux de camions et de voitures s'en retrouverait donc augmentée, ce qui est un effet indirect positif de cette modification de vitesse sur autoroute.

Les simulations ont par ailleurs mis en évidence qu'une augmentation de la vitesse maximale autorisée n'avait que très peu d'impacts positifs. En heure de pointe, le réseau belge étant totalement saturé, il n'existe virtuellement aucun avantage à modifier la vitesse maximale. En heure creuse, le constat est presque le même. On note par contre une amélioration du temps de parcours durant la nuit (de 22h à 6h), mais qui se fait au détriment de l'environnement (une augmentation de la vitesse limite entraîne une hausse de la consommation des véhicules). De plus, le trafic étant très faible la nuit, les gains observés sont en réalité très minimes comparé au temps total passé dans le trafic quotidiennement. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que la Belgique, colonne vertébrale du réseau européen, est le seul pays parmi ses voisins à avoir une limitation à 120km/h. En effet, la France, les Pays-Bas, l'Allemagne et le Luxembourg ont une vitesse limite plus élevée sur autoroute.

Les gains de temps observés sur l'entièreté du réseau semblent donc conséquents lorsque les vitesses sont diminuées en heure de pointe. S'agissant d'une étude préliminaire et basée sur des simulations, l'intention n'a pas été d'effectuer bilan économique de ces mesures. Cependant, à plus ou moins long terme, il faudrait quantifier les gains de ces mesures en comparaison des coûts liés à l'implémentation de tels systèmes. On l'a vu, cette diminution et homogénéisation de vitesse à un effet bénéfique sur la mobilité et la sécurité routière. De plus un effet collatéral direct est un effet bénéfique pour l'environnement. En effet, comme montré dans la revue de la littérature, une vitesse plus homogène entraîne une diminution de carburant, par rapport aux freinages et accélérations répétées, très énergivores. Les scénarios de diminution dynamiques de vitesses ont montré comme résultats une augmentation nette de la vitesse moyenne, pour atteindre presque 60 km/h, ces vitesses permettent aussi de consommer moins de carburant.

Cet effet sur la diminution de consommation est extrêmement intéressant car il va dans le sens des limitations d'émissions imposées par l'Union Européenne à ses pays membres. D'ailleurs, certains pays comme l'Autriche appliquent déjà des limitations de vitesse dynamiques afin de limiter leurs émissions.

6.5 Acceptabilité et mise en place de modification de vitesse en Belgique

Les effets d'un changement de limitation de vitesse, dynamique ou non, ne pourraient avoir lieu que si les automobilistes et chauffeurs appliquent scrupuleusement les indications leur étant données le long des routes : soit par leur acceptabilité, soit par un contrôle rigoureux des vitesses.

Malheureusement, dans le contexte des vitesses employées sur autoroute, les conducteurs belges ne semblent pas être parmi les meilleurs élèves européens. En effet, à l'heure actuelle, un quart des Belges trouvent qu'il est acceptable de rouler 20 km/h au-dessus de la limitation de vitesse sur autoroute. Ils sont même jusqu'à 32% à trouver acceptable de rouler 10 km/h au-dessus des limitations, peu importe le type de route employée. Cela suggère que le belge n'est pas spécialement regardant vis à vis du respect de la limitation de vitesse imposée. D'ailleurs, 75% de ceux-ci ont admis avoir roulé au moins une fois en excès de vitesse au cours du mois écoulé. Cette valeur est au-delà de la limite européenne. Ce type de comportement peut être partiellement expliqué par le fait que les conducteurs belges semblent mal percevoir les dangers de rouler plus vite que la limitation de vitesse autorisée, en particulier chez les jeunes. De plus, ils semblent mal percevoir les avantages d'une vitesse plus lente. Enfin et malgré ce constat, une portion importante de la population a déclaré qu'elle accélérerait de 10 km/h si la limitation de vitesse passait de 120 km/h à 130 km/h, ne diminuant de ce fait pas le nombre d'infractions.

Dans le cas d'une diminution dynamique de vitesse, il faudrait sans doute l'accompagner de campagnes de sensibilisation mettant en avant l'avantage collectif de telles méthodes, afin de responsabiliser les conducteurs à leur effet sur la mobilité, la sécurité et l'environnement. La nature de cette campagne sera encore à étudier dans de prochaines recherches sur le sujet. Bien entendu, en parallèle, un système de contrôle de vitesses rigoureux semble essentiel, afin d'assurer l'efficacité de ces modifications dynamiques. La multiplication des radars tronçon dans les zones fortement congestionnées permettrait certainement une bonne efficacité de tout le système. Concernant l'augmentation de vitesse limite à 130 km/h, p.ex. la nuit, et vu la proportion importante de gens déclarant vouloir rouler à 140 km/h, il faudrait a fortiori obtenir un contrôle plus important des vitesses, car le risque d'accident pourrait augmenter rapidement.

Il semble donc, dans tous les cas, qu'une sensibilisation et un contrôle strict devraient accompagner des mesures de changement de limitations, aussi bien à la hausse qu'à la baisse.

6.6 Recommandations

Les différents éléments apportés dans ce rapport montrent que des modifications de limitations de vitesse sur les autoroutes belges pourraient avoir un effet significatif sur la mobilité, la sécurité routière et l'environnement. Il pourrait donc être opportun d'apporter des modifications de limitation de vitesse à la lumière de ce qu'a montré ce rapport.

Une augmentation de la vitesse maximale autorisée à 130 km/h a un impact légèrement positif sur la mobilité et un impact négatif sur l'environnement. Si cette mesure était retenue, il faudrait alors définir (1) des lieux, (2) des moments et (3) des règles extrêmement strictes. Par exemple, ne l'autoriser que sur certains tronçons particuliers où la vitesse observée atteint déjà 130 km/h, et ne l'autoriser que de nuit par exemple (de 22h à 6h du matin), au moment où la densité de trafic est la plus faible. Cette mesure devrait s'accompagner d'un contrôle rigoureux des vitesses (radars tronçons) et d'une sensibilisation des conducteurs aux dangers de rouler en excès de vitesses (risque et gravité des accidents accrus).

Une diminution progressive de la vitesse maximale autorisée dans les zones congestionnées semble par contre être une excellente solution pour l'amélioration de la mobilité, de la sécurité routière et de l'environnement. Il n'existe aucun inconvénient à cette mesure. Cette solution offre un flux de trafic plus régulier, ce qui a pour effet d'augmenter la vitesse moyenne, de réduire le risque d'accident et de réduire les émissions de gaz et particules polluantes. Couplée à une interdiction de changer de bande dans les ralentissements, cette mesure s'est révélée être la plus efficace lors des simulations. Comme pour l'augmentation de la vitesse limite, un contrôle accru ainsi qu'une sensibilisation des conducteurs belges aux gains collectifs de ces mesures semblent essentiels. En effet, le conducteur belge semble peu respectueux des limitations de vitesse en générale et peu au courant des dangers des excès des vitesses. Le succès de cette mesure dépend de la compréhension et de l'acceptabilité des usagers autoroutiers.

Enfin, il est intéressant de noter que ces deux solutions (augmentation de nuit sous certaines conditions, et diminution lors des congestions) ne s'excluent pas mutuellement : elles pourraient être mises en place de concert, dans les zones les plus judicieuses pour chacune.

A présent, d'autres études semblent essentielles afin d'étudier les effets de changements de limitations de vitesse à une échelle plus régionale, locale, afin de pouvoir cibler les zones prioritaires. Ces zones seraient définies comme étant celles qui profitent le plus d'une diminution de la vitesse maximale autorisée : zones très congestionnées, zones accidentogènes, chantiers, *etc.*

De plus, une étude sur la mise en place de tels systèmes serait à présent utile afin de pouvoir identifier les étapes importantes : une fois de plus, les exemples des pays voisins pourraient être une excellente base de travail. Concrètement il serait important de connaître comment les conducteurs s'adaptent aux nouvelles limites, est-ce que les campagnes de sensibilisation ont un effet sur l'acceptabilité, et enfin toutes les mesures à prendre pour permettre une opérationnalisation et un suivi des limitations de vitesse dynamiques.

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1: Autoroutes traversant le territoire belge.....	10
Tableau 2: Chiffres clés concernant les accidents sur autoroute 2015.....	16
Tableau 3: Changement de comportement avoué des belges en matière de vitesse si la limitation de vitesse sur autoroute passait de 120 à 130 km/h (N =1000 ; enquête en ligne en collaboration avec iVOX). Le tableau correspond à des pourcentages. Les nombres en gras noir indiquent la proportion de personnes ne changeant pas de comportement ; les nombres en rouge indiquent la proportion de personnes augmentant leur vitesse de 10km/h.	20
Tableau 4: Effet d'une augmentation de la vitesse moyenne de 1 km/h sur l'incidence des accidents selon le modèle de Nilsson (Power Model).	27
Tableau 5: Effets liés à la mise en place d'une régulation dynamique des vitesses sur autoroute (adapté de Garcia-Castro & Monzon, 2014).	37
Tableau 6: Limitations de vitesse sur autoroute en Europe pour les voitures particulières et les camions. Source : http://ec.europa.eu	41
Tableau 7: Comparaison des réseaux autoroutiers et de leur accidentalité dans différents pays d'Europe.	47
Tableau 8: Excès de vitesse auto-déclarés durant les 12 derniers mois en Europe et par pays (% des personnes l'ayant fait au moins une fois au cours des 3 derniers mois). Source : Yannis, G., Laiou, A., Theofilatos, A., & Dragomanovits, A. (2016).....	51
Tableau 9: Comparaison des indicateurs de mobilités pour les différentes simulations effectuées, en une heure de pointe	61
Tableau 10: shift du trafic des nationales vers les autoroutes, en fonction du scénario considéré.	62
Tableau 11: Comparaison des indicateurs de mobilités pour les différentes simulations effectuées, en une heure de nuit.....	64
Tableau 12: Évolution de l'accidentalité en heure de pointe en fonction des différents scénarios.....	64
Tableau 13: Évolution de l'accidentalité en heure creuse en fonction des différents scénarios	65
Tableau 14: Évolution de l'accidentalité en heure de nuit en fonction des différents scénarios	65
Tableau 15: Comparaison de la production des différents gaz et consommation selon COPPERT en fonction des différents scénarios.	66
Tableau 16: Comparaison des émissions de gaz polluants en heure creuse en fonction des différents scénarios testés.....	66
Tableau 17: Comparaison des émissions de gaz polluants durant la nuit en fonction des différents scénarios testés.....	67
Tableau 18: Synthèse des résultats des différentes modélisations. Les pourcentages sont calculés par rapport à la référence. ↓ signifie une diminution importante, (↓) signifie tendance à la diminution, ↔ signifie sans effet, (↑) signifie tendance à l'augmentation, ↑ signifie augmentation importante, / signifie pas étudié.	68
Figure 1: Panneau signalant le début (F5) et la fin (F7) d'une autoroute en Belgique.....	9
Figure 2: Autoroutes et rings traversant le territoire belge (Adapté du réseau Stratec, 2016).....	10
Figure 3: Zones soumises aux limitations SMOG en région flamande. Source : Vlaams Verkeercentrum .	12
Figure 4: Réseau autoroutier wallon soumis aux alertes SMOG.	13
Figure 5: Localisation des boucles de comptage (à double induction) sur le territoire flamand.	14

Figure 6: Trafic moyen comptabilisé par boucle de comptage (en véhicules par heure) A: durant une heure de pointe (8h du matin) ; B: durant une heure creuse (11h du matin) et C: durant la nuit (23h).....	15
Figure 7: vitesse moyenne sur autoroute par bande de circulation en 2011 pour les véhicules légers (Riguelle, 2012)	17
Figure 8: vitesse moyenne sur autoroute par type de véhicule et par région (Riguelle, 2012)	17
Figure 9: vitesse moyenne sur autoroute par site	18
Figure 10: vitesse moyenne horaire sur autoroute (Riguelle, 2012).....	18
Figure 11: Exemple de panneau de signalisation de vitesse variable en France (panneau C25b).....	22
Figure 12: Classification des limites de vitesse variables (adapté de Garcia-Castro & Monzon, 2014).....	23
Figure 13: Relation entre vitesse et flux de trafic (avec V_c = vitesse critique et Q_{max} = débit maximum de trafic) et définition de la zone d'instabilité des conditions de circulation (d'après Beneš & Přibyl, 2014). ..	24
Figure 14: Relation entre vitesse et flux de trafic (dans le cas d'une autoroute dont la limite de vitesse est fixée à 70 mph) et effets attendus d'une augmentation de la limitation de vitesse et d'une augmentation de la capacité du réseau (Heydecker, 2011).	25
Figure 15: Variation de la probabilité d'accident, de blessure et de décès par rapport à une conduite à 120 km/h (calculée selon le Power Model).	28
Figure 16: Distance d'arrêt en fonction de la vitesse pour différentes catégories de surfaces, en considérant un temps de réaction d'une seconde (adapté de Vertet & Giausserand, 2006).....	29
Figure 17: Probabilité de blessure par niveau de gravité en fonction de la vitesse d'impact (adapté d'U.S. Department of Transportation, 2005).....	30
Figure 18: Taux d'accidents en fonction de la vitesse moyenne pratiquée sur une route limitée à 105 km/h (pour $\sigma = 9,5$ km/h et $\varphi = 790$ v/h) (adapté de Garber & Ehrhart, 2000).....	31
Figure 19: Courbe de régression des émissions de monoxyde de carbone (CO) en fonction de la vitesse (km/h) et de l'accélération d'un véhicule (m/s^2) (d'après Rakha <i>et al.</i> , 2000).....	33
Figure 20: Relation entre quantité de dioxyde de carbone (CO ₂) émise et vitesse moyenne des véhicules (adapté de Barth & Boriboonsomsin, 2008).	34
Figure 21: Limitations générales de vitesses sur autoroute en Europe.....	40
Figure 22: Intensité du trafic en fonction de la longueur du réseau autoroutier dans différents pays européens.....	48
Figure 23: Acceptabilité (pour soi, «personally» ou pour les autres conducteurs, «other people») de conduire 20 km/h plus vite que la limitation de vitesse en vigueur sur une autoroute à gauche) et sur une route résidentielle (à droite) par pays (% d'acceptabilité: scores 4 et 5 d'une échelle Likert allant de 1 (inacceptable) à 5 (acceptable)). Source : Yannis, G., Laiou, A., Theofilatos, A., & Dragomanovits, A. (2016).....	49
Figure 24: Acceptabilité de conduire jusqu'à 10 km/h plus vite que la limitation de vitesse légale, par pays (% d'acceptabilité: scores 4 et 5 d'une échelle Likert allant de 1 (inacceptable) à 5 (acceptable)). Source : Yannis, G., Laiou, A., Theofilatos, A., & Dragomanovits, A. (2016).	50
Figure 25: Les opinions sur la vitesse en Europe et son influence sur la sécurité routière, par groupe d'âge. Source : Yannis, G., Laiou, A., Theofilatos, A., & Dragomanovits, A. (2016).....	52
Figure 26: Réseau routier modélisé. Les arcs rouges correspondent au réseau macroscopique, les arcs bleus correspondent au réseau mésoscopique.	54
Figure 27: Courbe vitesse-débit d'une bande de circulation sur autoroute. Trois modifications possibles : Vitesse limite, puissance et capacité maximale. La partie grisée n'est pas à prendre en compte. Adapté de Stratec.....	56

Figure 28: Vitesses moyennes observées sur le réseau belge < 35 km/h en fonction des 3 scénarios. A : Situation de référence, B : Augmentation de la vitesse limitée à 130 km/h ,C : diminution dynamique de vitesse en fonction du trafic , D : diminution dynamique de vitesse et homogénéisation du trafic59

Figure 29: Vitesses moyennes modélisées sur le réseau belge < 35 km/h en fonction des 3 scénarios. A : Situation de référence, B : Augmentation de la vitesse limitée à 130 km/h ,C : diminution dynamique de vitesse en fonction du trafic , D : diminution dynamique de vitesse et homogénéisation du trafic60

Figure 30: Modification du ratio de trafic autoroute/ route nationale par rapport à la référence.A : Scénario Vdim ; B : scénario Vopt, C : scénario V130. Un ratio de 0.9 veut dire une diminution du trafic de 10% ; un ratio de 1.1 veut dire une augmentation du trafic de 10%.62

Figure 31: Évolution des vitesses moyennes en fonction des différents scénarios. A : référence ; B : scénario V₁₃₀ ; C : scénario V_{opt}.63

RÉFÉRENCES

- Aarts L. et van Schagen I. (2006). *Driving speed and the risk of road crashes: A review*. Accident Analysis & Prevention, Vol. 38, Issue 2, Mars 2006, 215-224.
- Adminaite, D., Allsop, R., & Jost, G. (2015). Ranking EU progress on improving motorway safety.
- Ahn K. (2002). *Modeling Light Duty Vehicle Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels*. Thesis dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Ahn K., Rakha H., Trani A. & Van Aerde M. (2002). *Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels*. Journal of Transportation Engineering 128(2), mars 2002.
- Akin D., Sisiopiku V.P., Skabardonis A. (2011). *Impacts of Weather on Traffic Flow Characteristics of Urban Freeways in Istanbul*. 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Stockholm, Sweden June 28 - July 1, 2011.
- Barlow T.J. & Boulter P.G. (2009). *Emission factors 2009: Report 2 – A review of the average-speed approach for estimating hot exhaust emissions*. TRL, Juin 2009.
- Barth et Boriboonsomsin (2008). *Real-World CO2 Impacts of Traffic Congestion*. Paper for publication in Transportation Research Record Submitted March 31, 2008.
- Baruya A. (1997). *A Review of speed-accident relationship for European roads: public MASTER*. Transport Research Laboratory.
- Beneš J. & Příbyl P. (2014). *Effects of highway management on traffic flow characteristics*. Archives of Transport System Telematics, vol. 7, issue 2, mai 2014.
- Bentham (van) A (2015). *What is the optimal speed limit on freeways?* Journal of Public Economics 124 (2015) 44-62.
- Bijnsgebouw A. (2015). *Doorstromingsstudie: Snelheidsbeperking 70 km/u op Antwerpse ring R1*. Studie rapport, MOW.
- Cameron M.H. et Elvik R. (2010). *Nilsson's Power Model connecting speed and road trauma: Applicability by road type and alternative models for urban roads*. Accident Analysis & Prevention, Volume 42, Issue 6, November 2010, 1908–1915.
- Chin S.M., Franzese O., Greene D.L., Hwang H.L. et Gibson R.C. (2004). *Temporary Losses of Highway Capacity and Impacts on Performance: Phase 2*. Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Novembre 2004.
- CEDR (2009). *L'harmonisation des PMV en Europe*. Secrétariat général de la Conférence Européenne des Directeurs des Routes.
- CEE-ONU (2010). *Résolution d'ensemble sur la signalisation routière*. Comité des Transports Intérieurs, Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies, New York et Genève, 2010.
- Cirillo J. A. (1968). *Interstate System Accident Research Study II, Interim Report II*. Public Roads, 35, 71-75.
- Commission européenne (2010). *Meilleures pratiques en matière de sécurité routière - Guide des mesures au niveau des pays*. Disponible : http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/projects/supreme-c_fr.pdfhttp://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/projects/supreme-c_fr.pdf (juillet 2016).
- Commission européenne (2017). *Intelligent Speed Adaptation (ISA)*. Mobility and transport, Road Safety. https://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/speed/new_technologies_new_opportunities/intelligent_speed_adaptation_isa_enhttps://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/speed/new_technologies_new_opportunities/intelligent_speed_adaptation_isa_enhttps://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/speed/new_technologies_new_opportunities/intelligent_speed_adaptation_isa_en (janvier 2017).

- Croq A. et Le Maître H. (2013). *La prise en compte du bruit dans les investissements de transport*. Document de rapport d'évaluation socio-économique des investissements publics du Commissariat général à la stratégie et à la prospective, Département Développement durable, octobre 2013.
- Dabin D., Dickens C. et Wouters P. (2013). *Estimateur à noyau (KDE) sur réseaux: une application aux accidents de la route belges*. BSGLG, 60, 2013, 21-31.
- Degrauwe B., De Coensel B., De Vlack L., De Vlieger I. et Botteldoorn D. (2012). *Potential of variable speed limits for emission and noise reduction on the E313 motorway to Antwerp*. Belgium. 19th ITS World Congress, Vienna, Austria, 22/26 October 2012.
- DSCR (Délégation à la Sécurité et à la Circulation Routière) (2007). *La vitesse, connaître ses effets et ses risques*. Brochure, Paris, septembre 2007.
- Duret, A. (2014). *A multi-lane capacity model designed for variable speed limit applications*, in: Transport Research Arena 2014, Paris.
- ECMT. (2007). *Congestion management measures that release or provide new capacity*. In OECD/ECMT (Eds.), *Managing urban traffic congestion* (pp. 229). France: OECD Publishing.
- Elvik R., Christensen P., Amundsen A. (2004). *Speed and road accidents: an evaluation of the Power Model*. TOI report 740/2004, Institute of Transport Economics, Oslo.
- Elvik R. (2005). *Speed and road safety : synthesis of evidence from evaluation studies*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1908), 59-69.
- Elvik R. (2009). *The Power Model of the relationship between speed and road safety*. Oslo, NO: Institute of Transport Economics.
- Essen H. (van), Schrotten A., Otten M., Sutter D., Schreyer C., Zandonella R., Maibach M. et Doll C. (2011). *External costs of transport in Europe*. Update Study for 2008. Delft, septembre 2011.
- ETSC (2015). *Ranking EU progress on improving motorway safety*. PIN Flash Report 28, mars 2015.
- ETSC (2016). *Speed limit displays on new car models 'not enough'*. ETSC News, October 26, 2016.
- FEHRL (2006). *Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces*. FEHRL Report 2006/02.
- Garber N.J. et Ehrhart A.A. (2000). *The effect of speed, flow, and geometric characteristics on crash rates for different types of Virginia Highways*. Virginia Transportation Research Council, Rapport final, Charlottesville, Virginie, janvier 2000.
- Garcia-Castro et Monzon A. (2014). *Homogenization effects of variable speed limits*. Transport and Telecommunication, Vol. 15, no. 2, 2014.
- Geistefeldt J. (2011). *Capacity effects of variable speed limits on German freeways*. Procedia Social and Behavioral Sciences 16 (2011) 48–56.
- GIEC (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Golob T.F., Recker W. et Alvarez V.M. (2004). *Freeway safety as a function of traffic flow*. Accident Analysis & Prevention, December 2004.
- Hartgen D.T. et Fields M.G. (2006). *Building Roads to Reduce Traffic Congestion in America's Cities: How Much and at What Cost?* Reason Foundation, août 2006.
- Hegyi, A., De Schutter, B. & J. Hellendoorn. (2005). *Optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 6(1), 102–112.
- Heydecker (2011). *Britain suffered fewer road accident fatalities during 2010 than ever before on record. Without more capacity, raising the speed limit will do little to alleviate congestion, and is likely to lead to more motorway deaths*. LSE

- Blog, The London School of Economics and Political Science. November 24th, 2011, Public Services and the Welfare State.
- Highways Agency. (2004). *M25 Controlled Motorways. Summary Report*. Bristol (UK): Highways Agency Publications Group.
- Hoogendoorn, S.P. (1999). *Multiclass continuum modelling of multilane traffic flow*. Delft, The Netherlands: Delft University Press.
- INRIX (2015). *Les embouteillages en baisse : conséquence d'une situation économique au ralenti et d'un chômage en hausse*. Disponible : <http://inrix.com/press/scorecard-report-france><http://inrix.com/press/scorecard-report-france> (juillet 2016).
- Johnson S.L. et Pawar N. (2005). *Cost-benefit evaluation of large truck- automobile speed limit differentials on rural interstate highways*. University of Arkansas, novembre 2005.
- Kloeden C.N., McLean A.J., Moore V.M. et Ponte G. (1997). *Travelling Speed and the Risk of Crash Involvement - Volume 1 - Findings*. NHMRC Road Accident Research Unit, University of Adelaide.
- Land Tirol. (May 24, 2012). *Tempo 100 auf der Autobahn – warum?* (In German). Available at <http://www.tirol.gv.at/themen/verkehr/verkehrsplanung/verkehrsprojekte/tempo100>
- Ligterink, N. E. (2016). *On-road determination of average Dutch driving behavior for vehicle emissions*. Delft: TNO.
- Ligterink N.E., Zyl (van) S. & Heijne V.A.M. (2016). *Dutch CO₂ emission factors for road vehicles*. TNO report.
- Maerivoet S. & Yperman I. (2008). *Analyse de la congestion routière en Belgique*. Transport & Mobility Leuven, rapport 07.15 pour le Service public Fédéral Mobilité et Transports.
- Marchesini P. & Weijermars (2010). *The relationship between road safety and congestion on motorways - A literature review of potential effects*. Institute for Road Safety Research (SWOV).
- Makarewicz, R. & M. Galuszka. (2011). *Road traffic noise prediction based on speed-flow diagram*. Applied Acoustics, 72(4), 190–195.
- Munden J. M. (1967). *The relation between a driver's speed and his accident rate*. RRL Report LR 88. Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire.
- Nissan, A. & X. Bang. (2006). *Evaluation of impacts of the motorway control system (MCS) in Stockholm*. In Proceedings of the European Transport Conference, AET. Strasbourg, France.
- Ntziachristos, L., Gkatzoflias, D., Kouridis, C., & Samaras, Z. (2009). *COPERT: a European road transport emission inventory model*. In Information technologies in environmental engineering (pp. 491-504). Springer Berlin Heidelberg.
- Nuyttens, N. et Van Belleghem G. (2014). *La gravité des blessures des victimes de la route. Analyse des scores MAIS des victimes de la route hospitalisées en Belgique entre 2004 et 2011*. Institut Belge pour la Sécurité Routière - Centre de connaissance Sécurité routière & Vrije Universiteit Brussel – Interuniversity Centre for Health Economics Research.
- OCDE (2010). *Gérer la congestion urbaine*, Éditions OCDE. <http://dx.doi.org/10.1787/9789282101315-fr>
- OCDE (2013). *Études économiques de l'OCDE : Belgique 2013*. Éditions OCDE.
- OMS (2006). *Air quality guidelines - global update 2005*.
- Papageorgiou, M., & Kotsialos, A. (2000). *Freeway ramp metering: An overview*. In Intelligent Transportation Systems, 2000. Proceedings. 2000 IEEE (pp. 228-239). IEEE.
- Papageorgiou M., Kosmatopoulos E. et Papamichail I. (2008). *Effects of variable speed limits on motorway traffic flow*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2047), 37-48.
- Rakha H., Van Aerde M., Ahn K. et Trani A.A. (2000). *Requirements for evaluating traffic signal control impacts on energy and emissions based on instantaneous speed and acceleration measurements*. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board 1738(-1), January 2000.

- Rakha H., Pecker C. et Cybis H. (2007). *Calibration Procedure for Gipps Car-Following Model*. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, January 2007.
- Richards (2010). *Relationship between speed and risk of fatal injury: Pedestrians and car occupants*. Department for Transport, Transport Research Laboratory, London.
- Robertson S., Ward H., Marsden G., Sandberg U. et Hammerstrom U. (1998). *The effect of speed on noise, vibration and emissions from vehicles*. Working Paper R 1.2.1.
- Robbins, A. (2016). *How to understand the results of the climate change summit: Conference of Parties21 (COP21) Paris 2015*. Journal of public health policy, 37(2), 129-132.
- Rosén E. et Sander U. (2009). *Pedestrian fatality risk as a function of car impact speed*. *Accident Analysis and Prevention*, 41, 536-542.
- Ruidavets et Ferrières (2007). *La pollution atmosphérique : un facteur de risque de maladie cardiovasculaire*. STV, vol. 19, n° 9, novembre 2007.
- Shankar et Mannering (1998). *Modeling the endogeneity of lane-mean speeds and lane-speed deviations: a structural equations approach*. *Transpn Res.-A*, Vol. 32, No. 5, pp. 311-322, 1998.
- Slootmans F. et De Schrijver G. (2015). *Les tués sur les autoroutes. Analyse approfondie des accidents de la circulation mortels sur les autoroutes belges pendant la période 2009-2013*. Bruxelles, Belgique : Institut Belge pour la Sécurité Routière - Centre de Connaissance de Sécurité Routière.
- Solomon D. R. (1964). *Accidents on Main Rural highways related to Speed, Driver and Vehicle*. US Department of Commerce, Federal Bureau of Highways, Washington DC.
- Soole, D. W., Watson, B. C., & Fleiter, J. J. (2013). *Effects of average speed enforcement on speed compliance and crashes: A review of the literature*. *Accident Analysis & Prevention*, 54, 46–56.
- Sugiyama Y., Fukui M., Kikuchi M., Hasebe K., Nakayama A., Nishinari K., Tadaki S.I. et Yukawa S. (2008). *Traffic jams without bottlenecks - experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam*. *New Journal of Physics* 10 (2008) 033001, 7 pp.
- SWOV. (2012). *Fact sheet - The influence of weather on road safety*. Leidschendam, The Netherlands, Institute for Road Safety Research, février 2012.
- SWOV (2014). *SWOV Fact sheet - Road crash costs*. Institute for Road Safety Research, mars 2014.
- TRB (2000). *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, USA.
- Torfs, K., Meesmann, U., Van den Berghe, W., & Trotta, M. (2016). *ESRA 2015 - The results. Synthesis of the main findings from the ESRA survey in 17 countries*. ESRA project (European Survey of Road users' safety Attitudes). Brussels, Belgium: Belgian Road Safety Institute.
- Trotta, M. (2016). *Que nous apprennent les données GPS sur la vitesse sur nos routes ? - Mesure de comportement vitesse hors agglomération 2015*. Bruxelles, Belgique: Institut Belge pour la Sécurité Routière - Centre Connaissance Sécurité Routière.
- U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration (2005). *Tire pressure monitoring system. FMVSS no. 138. Final regulatory impact analysis*. Washington D.C.
- Vanhove F. (2009). *Impact van maximumsnelheid op autosnelwegen*. Transport & Mobility Leuven.
- Van Nes N., Brandenburg S. & Twisk. D. (2008). *Dynamic speed limits; effects on homogeneity of driving speed*. *Intelligent Vehicles Symposium, IEEE*, 269.
- Vertet M. et Giausserand S. (2006). *Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes*. Sétra, 2006.
- Yannis, G., Laiou, A., Theofilatos, A., & Dragomanovits, A.(2016). *Speeding*. ESRA thematic report no. 1. ESRA project (European Survey of Road users' safety Attitude). Athens, Greece: National Technical University of Athens

- Wang H., Li Z., Hurwitz D. et Ni D. (2012). *Traffic speed variance modeling with application in travel time*. TRB 91th Annual Meeting, Washington D. C., janvier 2012.
- Woensel (van) T. et de Kok A.G. (2012). *Analysis of Travel Times and CO2 Emissions in Time-Dependent Vehicle Routing*. Vol. 21, No. 6, November–December 2012, pp. 1060-1074.
- Zegeye, S.K., De Schutter, B., Hellendoorn, J. & E.A. Breunese. (2010). *Variable speed limits for area-wide reduction of emissions*. In Proc. of the 13th International IEEE Intelligent Transportation Systems (ITSC) (pp. 507–510). Funchal, Portugal.
- Zhikai, J., Xiaoxiong, Z. & Y. Hongwei. (2004). *Simulation research and implemented effect analysis of variable speed limits on freeway*. In Proc. of the 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (pp. 894). Washington.



Institut Belge pour la Sécurité Routière
Chaussée de Haecht 1405
1130 Bruxelles
info@ibsr.be

Tel.: 02 244 15 11
Fax: 02 216 43 42