



Programme PREDIT- Groupe Opérationnel 2 - Gestion du trafic

Contrat n° 2010 MT CVS 121

Financement : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, et de l'Energie

Mesure et mOdélisation de la COngestion et de la POllution Tâche 0

Rapport n° 0.4

Impact des régulations
des autoroutes périurbaines sur
la congestion,
la pollution
et la sécurité routière

 $Coordination: Christine\ Buisson$

17-novembre 2014















Contributeurs – Remerciements

Ce rapport est issu de la collaboration MOCoPo qui a concerné principalement les personnes suivantes (par ordre alphabétique) :

- Michel André, LTE, IFSTTAR;
- Christine Buisson, LICIT, IFSTTAR/ENTPE
- Carlos Canudas de Vit, GipsaLab, INRIA, CNRS, U. J. Fourier;
- Hervé Chanut, Air Rhône-Alpes;
- Claire Chappaz, Air Rhône-Alpes;
- Aurélie Charron, LTE, IFSTTAR;
- Dimitri Daucher, LEPSIS, IFSTTAR;
- Laurent Debize, LICIT, IFSTTAR/ENTPE;
- Massoud Fallah, LTE, IFSTTAR et CEREA, ENPC/ CEA
- Mathieu Goriaux, LTE, IFSTTAR;
- David Guilbert, LRPC Angers, CETE de l'Ouest;
- Christophe Hubert, DIR Centre Est;
- Cedric Lebastard, LRPC Angers, CETE de l'Ouest;
- Delphine Lejri, LICIT, IFSTTAR/ ENTPE;
- Philippe Mansuy, DIR Centre Est;
- Florian Marczak, LICIT, IFSTTAR/ENTPE;
- Antoine Montenon, LTE, IFSTTAR;
- Fabio Morbidi, GipsaLab, INRIA, CNRS, U. J. Fourrier.
- Celine Parzani, LICIT, IFSTTAR/ENTPE;
- Anaïs Pasquier, LTE, IFSTTAR;
- Cindy Pellet, Air Rhône-Alpes;
- Lucie Polo, LGGE, U. J. Fourier et LTE/ IFSTTAR;
- Olivier Richard, CETE de Lyon;
- Christian Seigneur, CEREA, ENPC/CEA;
- Cécile Trébuchon, Air Rhône-Alpes;
- Florence Troude, Air Rhône-Alpes.

Nous remercions les personnes extérieures à la collaboration qui ont participé à la réunion MOCoPo du 3 octobre 2013 au CERTU pour leurs contributions aux réflexions présentées ici :

- Laurent Bigou, CERTU;
- Aurélien Duret, CETE de Lyon ;
- Bruno Levilly, DIR Centre Est;
- Frédéric Murard, CETE de Lyon ;
- Antoine Oser, CERTU;
- Marin Pailloux, DIR Centre Est;
- Sylvain Troubetsky, DIR Centre Est.

Par ailleurs, nous avons sollicité deux personnes de l'IFSTTAR pour enrichir nos informations. Nous les remercions également :

- Maurice Aron, GRETTIA, IFSTTAR;
- Jean-Louis Martin, UMRESTTE, IFSTTAR/U. Cl. Bernard Lyon I.

Néanmoins, la collaboration MOCoPo reste seule responsable des éventuelles erreurs que ce rapport pourrait contenir.

Nos remerciements vont également aux personnes qui se sont diligemment chargées de l'organisation matérielle des réunions et déplacements et du suivi administratif et financier, dans chacun des organismes participants. Une reconnaissance particulière est due à Sonia Cenille pour son travail de saisie.

Enfin, l'ensemble du travail réalisé au cours des quatre années (dont trois officielles) qu'a duré la collaboration MOCoPo a été grandement facilité par la bienveillance vigilante d'Arantxa Julien, chargée par la DRI de suivre ce programme PREDIT. Qu'elle soit ici chaleureusement remerciée ainsi que la DIR (direction de la Recherche et de l'Innovation du MEDDE) qui a financé ce projet, sans oublier le groupe opérationnel 2 du PREDIT (Gestion du trafic) qui l'a sélectionné.

Résumé

Ce rapport est destiné à capitaliser les résultats obtenus dans le cadre de MOCoPo et dans d'autres projets ou recherches pour permettre une évaluation multicritère a priori des dispositifs de régulations des autoroutes périurbaines. L'idée est en effet qu'il est actuellement très difficile d'étendre le linéaire autoroutier périurbain ou d'élargir les voies existantes. Seul le recours à des méthodes de régulation dynamiques, à même d'optimiser le fonctionnement de ces réseaux, tels qu'ils sont, pourra réduire les externalités négatives induites par le trafic périurbain. Néanmoins, dans une perspective de développement durable, il faut prendre en compte plusieurs critères (environnement, efficacité du système, sécurité des usagers) simultanément.

Pour trois externalités négatives (congestion, pollution de l'air, insécurité routière), une description des indicateurs caractéristiques est présentée ainsi que leurs dépendances à plusieurs variables associées aux conditions de conduite : kilomètres parcourus, vitesses, variabilité des vitesses, nombre de changements de voies.

L'ensemble des dispositifs de régulation dynamique des autoroutes est dans un deuxième temps passé en revue avec une analyse détaillée de leur fonctionnement. Ceci permet ensuite pour chacune d'entre eux de voir comment il va agir sur les conditions de conduite, et donc, *in fine* sur les trois externalités négatives que nous étudions. Un tableau synthétique est dressé.

Table des matières

	Con	tribu	teurs – Remerciements	3
	Rés	umé.		5
١.	Ir	ntrod	uction	11
ΙΙ.	Ir	npac	t des conditions de conduite sur trois externalités	13
	1.	Con	gestion	13
	Α	. N	1écanismes de base	13
		a)	Définition	13
		b)	Deux types de congestion : congestion d'offre et congestion de demande	13
		c)	Complexification du schéma de base : variabilité des vitesses en un point	14
	В	. C	ongestions fréquemment observées sur autoroutes	16
		a)	Réduction de l'offre en un point de l'autoroute	16
		b)	Offre réduite à la suite d'un divergent	16
		c)	Demande forte à un convergent	16
		d)	Forte demande de changement de voie à une section d'entrecroisement	17
		e)	Impact des changements de voies	17
		Р	rocessus conduisant à un changement de voie	17
		С	onséquences d'un changement de voie sur le trafic	18
		f)	Impact des variabilités des vitesses désirées	18
	2.	Poll	ution de l'air	19
	Α	. N	lécanismes généraux à l'œuvre dans les émissions de polluants	19
	В	. D	épendance des émissions aux conditions de réalisation des déplacements	21
		a)	Dépendance aux kilomètres parcourus	21
		b)	Dépendance à la variabilité des vitesses	21
	3.	Insé	curité routière	22
	Α	. N	1éthodes disponibles	22
		a)	Simulations dynamiques	23
		b)	Analyses statistiques	24
	В	. D	épendance de l'insécurité routière aux conditions de réalisation du déplacement	25
		a)	Dépendance aux kilomètres parcourus	25
		b)	Dépendance au débit	25
		c)	Dépendance aux vitesses pratiquées	25
		d)	Dépendance aux changements de voie	26
		e)	Récapitulatif des effets des différentes modifications des conditions de trafic	26
		f)	Implication de l'insécurité routière sur les conditions de trafic	26
III.		Rég	ulation des autoroutes périurbaines	27
	1.	Opt	imisation de la répartition de la demande dans l'espace et dans le temps	28

	a)) Information et guidage des usagers après leur départ	. 28
	b) Information des usagers avant le départ (modification de l'heure de départ)	. 29
	c)	Tarification	. 29
		Zones de tarification	. 29
		Temporalité de la tarification	. 29
		Tarifications applicables sur le réseau périurbain dans le cadre de la régulation dynami de la demande	-
2.	R	égulations dynamiques de l'écoulement	. 31
	A.	Régulation d'accès	. 31
	B.	Régulation dynamique des vitesses maximales autorisées	. 32
	a)) Régulation des vitesses pour un trafic fluide	. 32
	b) Régulation des vitesses maximales autorisées pour créer une congestion contrôlée	. 33
	C.	Gestion dynamique des voies	. 34
	D.	Régulation dynamique de l'interdiction de dépassement des poids lourds	. 34
3.	Α	ctions sur la répartition modale	. 35
IV. impa		roisement des différentes régulations dynamiques des autoroutes périurbaines et sur la congestion, la pollution et l'insécurité routière	
٧.	Con	clusions	. 41
	Réfé	érences	43

Liste des figures

I. Introduction

Nous concluons les recherches conduites dans le cadre du projet MOCoPo par ce rapport qui est une première étape vers une évaluation multicritère des actions de régulation du trafic. Ce travail est basé sur deux piliers : d'une part une synthèse partielle des différentes recherches conduites dans le cadre de ce projet (et ailleurs) sur l'impact de la circulation sur voies rapides urbaines sur trois externalités négatives : la congestion, la pollution de l'air et l'insécurité routière ; d'autre part sur les connaissances détenues par les membres de la collaboration et les personnes qu'ils ont consultées sur les différentes formes de régulation des autoroutes périurbaines ainsi que sur les externalités de la circulation automobile.

Ce rapport n'est pas à proprement parler un résumé des travaux conduits par la collaboration MOCoPo de 2011 à 2014. L'intégralité des rapports qui présentent ces travaux pourra être trouvée sur le site web du projet¹, ainsi que les données collectées. La figure suivante montre l'organisation des sept tâches de recherche du projet, en distinguant les tâches de collecte de données et les tâches de développement de modèles ou de confrontation de modèles préexistants avec les données collectées.

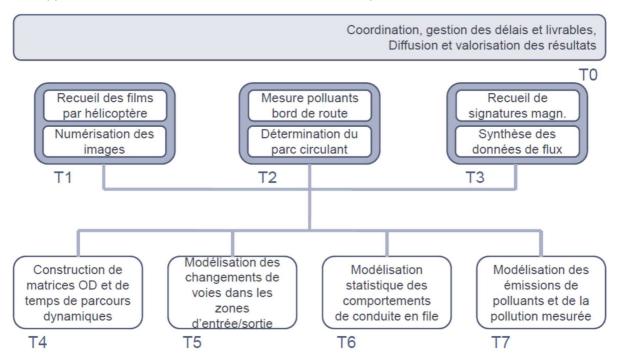


Figure 1 : Organisation générale du projet MOCoPo : les trois tâches de mesure et les quatre tâches de modélisation.

Chaque tâche de mesure a livré des données qui sont accessibles à tous sur le site web, moyennant l'enregistrement dans la liste des utilisateurs. La liste des rapports produits est la suivante :

- Trois rapports d'avancement pour chacune des années de travail effectif :
 - o Livrable 0.1 (avancement 2011);
 - o Livrable 0.2 (avancement 2012);
 - Livrable 0.1 (avancement 2013);
- Le livrable 3 qui présente les recueils de données réalisées avec les capteurs magnétomètres : la position des capteurs, la nature et la qualité des données recueillies. Ce rapport présente également les analyses de fiabilité de ces capteurs par une comparaison avec des recueils par caméras et boucles électromagnétiques. Notre idée était en effet de réaliser une étude de

¹http://mocopo.ifsttar.fr/

faisabilité de la détermination de matrices origines destination dynamique par ce type de capteur. Les magnétomètres produisent en effet une signature magnétique caractéristique au passage des véhicules. Pour pouvoir construire une matrice origine destination il faut pouvoir associer une signature relevée en entrée avec l'une de celles relevées en sortie. Le taux de lectures est donc une donnée très importante.

- Le livrable 4.1 présente le travail de modélisation du trafic nécessaire pour fournir une fenêtre temporelle pendant laquelle le véhicule identifié en entrée est le plus susceptible d'être réidentifié sur le capteur de sortie de manière à maximiser les chances de bonne identification.
- Le livrable 4.2 présente la méthode retenue pour réaliser la ré-identification.
- Le livrable 5 présente le travail réalisé à partir des données individuelles de trajectoires sur les changements de voies au voisinage des discontinuités du réseau routier.
- La tâche 6 était consacrée à la modélisation stochastique deux sous-tâches ont été réalisées, associées respectivement à la modélisation des changements de voies et à la conduite en file : les livrables associés sont les livrables 6.1 et 6.2.
- Enfin la tâche 7 était consacrée à la confrontation entre les données et les résultats des modèles de pollution (la première sous tâche prédisant les émissions compte tenu du volume et de la composition du trafic, la seconde confrontant les données recueillies en tâche 2 avec les niveaux de pollution prédits compte tenu de la dispersion des émissions issues de la tâche 7.1).

Le présent rapport est consacré à la présentation de l'examen de l'impact des régulations dynamiques des autoroutes urbaines, compte tenu de ce que nous avons appris au cours du projet sur la génération de la pollution, de la congestion et de l'insécurité routière.

On peut regretter que ce travail ne s'applique qu'aux autoroutes urbaines et, de manière encore plus restreinte (devrait-on dire « pire » ?), seulement au trafic de véhicules légers individuels sur ces autoroutes. Conscients que ce trafic ne représente qu'une partie des déplacements, qu'il ne génère qu'une partie des externalités, nous nous sommes cependant limités volontairement à cette sous partie du système de transport urbain pour plusieurs raisons.

- Tout d'abord, pour de nombreux citadins habitant et travaillant en banlieue, les transports collectifs ne représentent pas, pour l'instant, une alternative crédible à la voiture solo.
- Ensuite, les autoroutes urbaines sont le siège de très nombreuses congestions, qui affectent prioritairement ces usagers contraints (suivant les sources d'information, la congestion sur ces infrastructures est considérée comme représentant 70 à 85 % du temps total perdu mesuré en circulation).
- De plus, les pollutions dont ces autoroutes sont à l'origine affectent des riverains qui n'ont pas toujours le choix de leur résidence (par exemple on rapporte qu'à Grenoble, 50 % des logements en HLM sont à moins de 200 m d'une autoroute urbaine).
- Enfin, c'est sur ces autoroutes que les actions de régulation ont potentiellement le plus d'efficacité sur la congestion, sans que l'on ne dispose jusqu'ici de récapitulatif de leurs impacts sur la sécurité routière et sur la pollution.

Ce rapport est donc composé des parties suivantes : d'abord on analyse l'impact des conditions de conduite sur les trois externalités négatives que sont la congestion, la pollution de l'air et l'insécurité routière. Ensuite on détaille comment les régulations agissent sur ces conditions de conduite. On peut alors dresser un tableau de synthèse. Nous conclurons sur les pistes de recherches mises en évidence au cours de ce rapport et qui restent à explorer.

II. Impact des conditions de conduite sur trois externalités

1. Congestion

A. Mécanismes de base

a) Définition

La congestion est un phénomène qui se produit lorsque l'offre (la capacité d'une artère exprimée en nombre maximum de véhicules/h) est inférieure à la demande.

Suivant les usagers et les exploitants elle est associée à différent termes : bouchons, encombrements, ralentissements etc... Elle est toujours caractérisée par une vitesse inférieure à la vitesse critique² et par un débit inférieur à la capacité. Tant que la demande est supérieure à l'offre la congestion perdure. Si l'offre augmente ou si la demande diminue, le bouchon se réduira progressivement.

b) Deux types de congestion : congestion d'offre et congestion de demande

La figure suivante illustre ce point en représentant la densité des véhicules et la trajectoire de certains d'entre eux. Deux cas sont présentés : en haut une congestion générée par une diminution de l'offre temporairement en un point : typiquement ce qui correspond à un accident ; et en bas une congestion générée par une augmentation de la demande : typiquement le cas d'une heure de pointe.

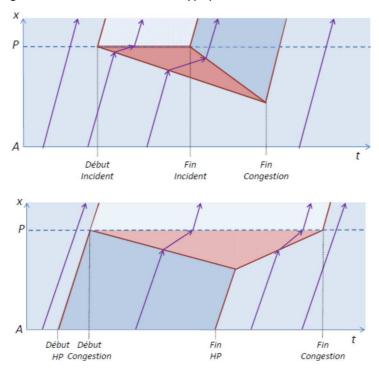


Figure 2 : Les deux grands cas de congestion du trafic routier : congestion d'offre en haut et congestion de demande en bas. Les flèches violettes représentent quelques trajectoires de véhicules, qui progressent au cours du temps (en abscisse) sur une voie (position x en ordonnée). La pente de chaque trajectoire à un instant représente la vitesse de ce véhicule. La densité de véhicules est matérialisée par la couleur : bleue pour le trafic fluide (d'autant plus foncée que la densité est élevée) et rouge pour le trafic congestionné, dans lequel les véhicules roulent à une vitesse inférieure à la vitesse critique. La figure du haut (1.a) présente le cas d'un incident (situé au point P, il dure entre les dates « début incident » et « fin incident »). Dans le cas de la figure du bas (1.b), la capacité est constante en P. En A entre « Début HP » (HP pour Heure de Pointe) et « Fin HP » la demande est supérieure à l'offre en P : à partir de « Début Congestion » une file d'attente se crée en amont de P. Source : (Buisson & Lesort, 2010)).

-

² La vitesse critique est la vitesse en dessous de laquelle le véhicule se voit imposer son comportement par le véhicule qui le précède. Typiquement sur autoroute urbaine elle est de 80 à 70 km/h.

Notons que:

- La congestion est toujours située à l'amont d'une « tête » de bouchon (point P sur les figures précédentes).
- Si la décroissance de la file d'attente est créée par une augmentation de l'offre, alors le bouchon régressera par sa « tête » (cf. figure 1.a). Le recul de la tête étant plus rapide que la croissance de la file d'attente à l'amont (la « queue »), le bouchon finira par disparaître.
- Si la décroissance de la file d'attente est créée par une diminution de la demande, alors la tête restera fixe mais sa longueur se réduira progressivement, sa queue se rapprochant progressivement de sa tête (figure 1.b).
- Dans toute la file d'attente, la vitesse moyenne est en première approximation constante et complètement déterminée par la capacité de la tête de bouchon.
- Tant que la congestion existe, le débit qui s'écoule à l'aval ce celle-ci (point P des figures 1.a et 1.b) est égal à la capacité de la tête de bouchon. Après la disparition de la congestion en ce point, le débit est égal à la demande.

La présence d'une congestion en amont de P écrête le débit qui passe en P à la valeur de la capacité de la voie en P. Si par un aménagement de voirie par exemple on augmente l'offre en P (au droit de la tête de bouchon) alors le débit ne sera plus limité. C'est la restriction de capacité suivante (au sens de située en aval de P) qui sera alors le lieu de la tête de bouchon.

Les réseaux autoroutiers étant le lieu de congestions très étendues dans l'espace, la jonction dans l'espace de deux (voire plus) congestions entre elles est très fréquemment observée. Seule une analyse fine du trafic à la fois par observation visuelle et par analyse des données de trafic permet de bien comprendre les mécanismes qui se produisent. Sur les autoroutes urbaines la répétitivité du phénomène d'un jour à l'autre permet cette analyse fine. L'opérateur veillera à la réaliser périodiquement.

c) Complexification du schéma de base : variabilité des vitesses en un point

Ce schéma simple étant posé il faut le compliquer quelque peu. En effet, dans ce qui précède, nous avons fait l'hypothèse que les vitesses de tous les usagers d'une voie sont identiques. Or, en réalité, ce n'est jamais réellement le cas. La variabilité entre les vitesses mesurées en un point est particulièrement élevée dans deux situations extrêmes :

- En régime très fluide, les distances entre véhicules étant grandes, les usagers ne se gênent pas entre eux et chacun adopte sa vitesse désirée. Celle-ci résulte au niveau individuel, de la réglementation (vitesse maximale réglementaire de 90 ou 110 km/h typiquement sur autoroute périurbaine mais aussi pour les poids lourds et les autocars vitesse maximale autorisée compte tenu de leur poids en charge), de la puissance du moteur et du chargement du véhicule, ainsi que du choix du conducteur.
- En régime congestionné, il se produit ce que les utilisateurs appellent les phénomènes d'accordéons, avec des vitesses relativement élevées puis plus faibles. La figure suivante illustre cela à partir des vitesses mesurées pas un réseau de capteurs très dense sur l'autoroute M42 près de Birmingham (Royaume Uni). Il est à noter que les ondes de trafic plus lent « remontent » le trafic dans le sens opposé aux véhicules et que leur pente est comprise entre 15 et 20 km/h quel que soit le pays d'observation.

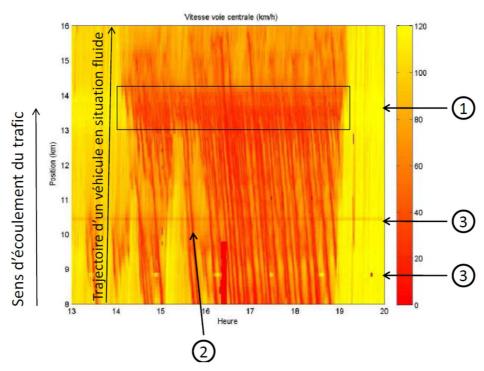


Figure 3 : Evolution spatio-temporelle d'une congestion : vitesses moyennes ³de la voie rapide mesurées chaque minute par 100 boucles environ sur une autoroute anglaise (M42) le vendredi 25 novembre 2005. La zone 1 correspond à la congestion fixe due à l'insertion en aval du kilomètre 14. La flèche 2 correspond à une sur-congestion qui traverse une zone légèrement congestionnée en allant dans le sens opposé au trafic. La vitesse avec laquelle cette sur-congestion remonte le trafic est d'environ 18 km/h. Les flèches 3 localisent des boucles ayant des défauts de recueil et communiquant une valeur anormale de la vitesse.

La figure suivante montre d'une part la relation ente la vitesse moyenne et le débit (diagramme fondamental –d'autres représentations de ce diagramme existent cf. (Buisson, 2004)-) à partir de mesures de boucles électromagnétiques pour les deux voies de l'A42 en entrée est de Lyon à 5 km du périphérique intérieur. D'autre part l'écart type des vitesses observées pour chaque période et la vitesse.

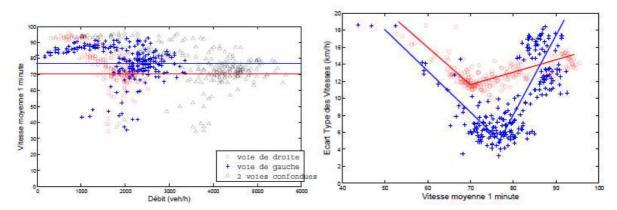


Figure 4 : Données recueillies par des boucles électromagnétiques sur l'A42 en entrée est de Lyon au cours d'une heure de pointe du matin. On différencie les valeurs de la voie de droite (ronds rouges) les valeurs de la voie de gauche (croix bleues) et sur la figure de gauche les valeurs qui concernent l'ensemble des deux voies. La figure de gauche est appelée le diagramme fondamental et représente les évolutions de la vitesse en fonction du débit. On constate que les valeurs de vitesses sont à peu près constantes en fonction du débit pour les valeurs supérieures au trait horizontal. Ce trait, ici dessiné à la main, matérialise la vitesse critique. En dessous de ce trait, la vitesse décroit simultanément avec le débit. Ceci correspond au régime

_

³ Il s'agit ici d'une des deux méthodes pour calculer une vitesse moyenne. Le lecteur intéressé par cette question se reportera à (Buisson & Lesort, 2010), encadré E, page 23.

congestionné où plus le débit est limité en aval, plus la vitesse est faible et la densité (nombre de véhicules par kilomètre) s'accroit. Sur la figure de droite on a représenté l'écart type des vitesses (qui est une mesure de la variabilité) en fonction de la vitesse moyenne. On constate que pour les vitesses élevées et pour les vitesses faibles la variabilité entre les véhicules est plus importante que pour les vitesses proches de la vitesse critique.

On constate bien qu'en un point de mesure, la variabilité des vitesses entre les usagers est plus forte lorsque le trafic est congestionné ou fluide que lorsqu'il est dans l'état intermédiaire, dit état critique. Cet état critique correspond au débit maximum (voir figure de gauche). Le débit est donc à son maximum concomitamment à une certaine homogénéité des vitesses.

B. Congestions fréquemment observées sur autoroutes

Intéressons-nous maintenant aux cas les plus fréquents de congestion sur un réseau autoroutier périurbain.

a) Réduction de l'offre en un point de l'autoroute

Si une autoroute passe en un point de trois voies à deux, et si la demande est supérieure à l'offre de ces deux voies, alors un bouchon se produit. Cette réduction peut-être temporaire par exemple si un véhicule en panne ou accidenté se trouve sur un des voies de la section courante (cas de la figure 1.a) ou permanente (cas d'un pont ou d'un tunnel) ce qui conduira à des congestions de demande (figure 1.b).

Il peut se produire le même phénomène alors que le nombre de voie reste constant si la vitesse de tous les véhicules ou de certains d'entre eux est réduite. C'est le cas si la demande est assez forte par exemple à l'entrée de certains tunnels qui n'ont pas de réduction de voie mais où l'obscurité brutale à l'entrée de ce tunnel surprend les conducteurs. Les usagers ont alors un sentiment d'insécurité qui les pousse à réduire leurs vitesses, créant aussi une congestion dont la tête est l'entrée du tunnel.

C'est également le cas, toujours si la demande est assez forte, si un poids lourd lent circule. On parle alors de bouchon mobile, puisque la tête de ce bouchon progresse vers l'aval à la vitesse de ce poids lourd. Si un second poids lourd plus rapide double ce premier poids lourd lent alors la congestion surviendra pour un niveau de demande plus faible, comme nous le reverrons plus loin.

b) Offre réduite à la suite d'un divergent

Les autoroutes urbaines sont toujours intégrées à un réseau urbain environnant, composé de carrefours (à feux, giratoires ...). Il y a donc toujours, en aval de la bretelle de sortie d'un divergent d'une autoroute urbaine, un carrefour urbain. Ceci conduit à une capacité limitée en sortie du divergent. Une file d'attente se forme, dont la longueur peut-être supérieure à celle de la bretelle ; la section courante est alors congestionnée. Suivant les configurations et les usages locaux, la file d'attente se positionne sur la file de droite, sur la bande d'arrêt d'urgence, voire sur l'ensemble des voies de circulation.

c) Demande forte à un convergent

La demande issue de la bretelle d'un convergent peut être (même de manière très momentanée) supérieure à la capacité résiduelle de la section courante c'est-à-dire à la différence entre la capacité à l'aval du convergent et la demande de la section courante. Une congestion se créera alors. Le convergent deviendra ainsi une tête de bouchon.

Il est important de noter au passage que la capacité de ce convergent, une fois la congestion installée, sera plus faible que la capacité en fluide. Suivant les auteurs et les sites d'observation la baisse de capacité est de 3 à 20 %. Cette baisse de capacité semble être due au temps nécessaire pour que des véhicules accélèrent depuis leur vitesse en congestion jusqu'à la vitesse correspondant à la capacité nominale.

Par ailleurs, il a été montré que même lorsque le trafic est fluide, les phénomènes d'insertion qui se produisent globalement à vitesse plus faible que celle de la section courante induisent derrière eux

des ralentissements sur la section courante, qui peuvent, dans les cas de demande forte, conduire ainsi à l'apparition de la congestion.

Notons au passage que dans le cas les autoroutes urbaines, connectées à un réseau urbain régulé par des feux, les arrivées des véhicules se produisent « par paquet ». Ces paquets créent artificiellement des à-coups dans la demande de la bretelle, conduisant ainsi à la congestion. Celle-ci mettra d'autant plus de temps à se résorber que la chute de capacité sera forte.

d) Forte demande de changement de voie à une section d'entrecroisement

Les sections d'entrecroisement où deux flux amont se croisent pour se diriger vers deux destinations peuvent, même à demande totale relativement faible, être des têtes de congestion. C'est le cas sur le réseau grenoblois à l'échangeur du Rondeau dans le sens dit « intérieur » (de St Martin d'Hères vers Grenoble), comme dans le sens dit « extérieur » inverse. Une partie des observations réalisées dans le cadre de MOCoPo ont eu lieu sur cet échangeur.

Comme nous venons de le voir ci-dessus pour les convergents, un changement de voie crée une perturbation pour les véhicules immédiatement situés en amont du véhicule qui s'insère. Cette gêne est d'autant plus forte en fluide que les véhicules sont proches les uns des autres sur la section courante (c'est-à-dire que le débit est proche de la capacité) et /ou que la vitesse du véhicule qui change de voie est significativement plus faible que celle des véhicules devant lesquels il s'insère.

Naturellement, plus le flot de conducteurs voulant changer de voie est élevé plus cette gêne est importante. Ainsi, pour une section d'entrecroisement, à demande totale identique, suivant les flux d'échanges entre les entrées et les sorties diamétralement opposées, il y aura apparition ou non de congestion.

e) Impact des changements de voies

Nous avons commencé à l'explorer ci-dessus, les changements de voies sont une des causes fréquentes de l'apparition de la congestion. Les résultats présentés ci-après ont été obtenus ou sont issus de la littérature recensée dans le cadre d'une des thèses consacrées à ce sujet dans le cadre de MOCoPo (Marczak, 2014).

Processus conduisant à un changement de voie

Les changements de voie que l'on observe sont la résultante d'un processus complexe de prise de décision du conducteur qui, s'il ressent le besoin de changer de voie, examinera s'il peut le faire en accord avec son niveau de sécurité. A cette examen par le conducteur qui veut changer de voie luimême, il faut ajouter les actions des conducteurs des véhicules de la voie cible, qui peuvent choisir d'accompagner cette manœuvre en accélérant, ralentissant, voire en réalisant des changements de voies de courtoisie.

Suivant la situation, le besoin de changer de voie correspondra soit à une obligation (pour rejoindre une bretelle de sortie ou pour quitter une bretelle d'accès) ou à une convenance personnelle, par exemple pour dépasser un véhicule jugé trop lent ou pour se rabattre sur la voie de droite après un dépassement. Dans le premier cas on parle de changement de voie obligatoire, dans le second de changement de voie discrétionnaire.

On peut supposer que les usagers qui peuvent choisir de changer de voie ou non vont rechercher des niveaux de sécurité plus élevés que ceux qui sont contraints de changer de voie. Sur ces deux sujets : d'une part établir une modélisation plus exacte de la décision de changer de voie, d'autre part progresser sur les conditions de sécurité que les usagers jugent acceptables, la recherche est en cours.

Nous ne nous intéresserons pas ici plus avant au mécanisme de décision de changer de voie mais à ses conséquences.

Conséquences d'un changement de voie sur le trafic

Lorsqu'un changement de voie se produit, la distance entre véhicules est modifiée que ce soit sur la voie cible (où elle devient plus courte) ou sur la voie de départ (où la distance entre véhicules est plus grande).

Sur la voie cible, le véhicule qui vient de s'insérer pousse le véhicule situé derrière lui à réduire sa vitesse pour maintenir une distance de sécurité acceptable. De plus, si le véhicule qui s'insère circule à une vitesse plus faible que celle du véhicule qui le précède, la distance entre ces deux véhicules va d'abord croitre puis, lorsque le véhicule changeur aura atteint une vitesse voisine de celle de son prédécesseur, l'écart entre ces deux véhicules sera stabilisé. Egalement, le nouveau suiveur du véhicule qui a changé de voie devra réduire sa vitesse pour maintenir une distance de sécurité acceptable avec le changeur.

On peut donc dire que transitoirement, lorsque les véhicules changent de voie, ils créent une gêne potentielle pour les usagers de la voie cible et un « trou » sur la voie de départ.

De proche en proche, si le trafic est dense sur la voie cible et/ou, si le nombre de véhicules changeant de voie est important, et/ou si leurs vitesses sont faibles comparées à celles de la voie cible, une congestion peut se produire sur la voie cible, en amont de la zone de changement de voies importants.

Ce résumé schématique de la situation créée lors d'une insertion montre malgré ses approximations qu'un nombre important de changements de voie peut induire l'apparition d'une congestion. Il faut retenir que cette apparition est d'autant plus probable que :

- La différence de vitesse est importante;
- Le débit d'insertion est important ;
- Le débit sur la voie cible est élevé.

f) Impact des variabilités des vitesses désirées

Nous avons mentionné plus haut que, en trafic fluide, les véhicules ont des vitesses désirées différentes. Ceci peut être une gêne à écoulement du trafic, si la demande est importante et si la vitesse des véhicules lents est significativement plus faible que celle des autres véhicules. On parle alors de « bouchon mobile ».

Si une voie est occupée par une véhicule lent, et que deux voies restantes restent libres à la circulation, alors la capacité de la route sera, derrière ce bouchon mobile, égale à la capacité des deux voies plus le débit imposé par ce véhicule lent. Dans le cas où l'obstacle mobile roule par exemple à 50 km/h la capacité sera de l'ordre de 1 600 veh/h sur la voie de droite et donc la capacité totale de 5 600 veh/h au lieu de 6 000 veh/h. Si le véhicule qui double ce véhicule lent est à son tour un véhicule plus lent que l'ensemble des autres véhicules, si par exemple il circule à 70 km/h, alors la capacité totale en sera encore réduite. Ceci se produit dans le cas d'un poids lourd doublant dans une rampe un autre poids lourd n'ayant pas les mêmes caractéristiques mécaniques (plus chargé ou moindre puissance moteur).

2. Pollution de l'air

A. Mécanismes généraux à l'œuvre dans les émissions de polluants

La pollution de l'air est issue de multiples sources (chauffages, industries, ...). Parmi celles liées au trafic autoroutier, on peut distinguer deux grandes familles de sources, les pollutions à l'échappement et les pollutions hors échappement.

- Les émissions dues à la combustion se dégagent du pot d'échappement. Plusieurs polluants différents sont émis :
 - o Le CO2 (dioxyde de carbone) n'est pas réglementé. Son taux d'émission est proportionnel à la consommation de carburant et donc à la vitesse du véhicule.
 - Pour les autres polluants :
 - PM10 (particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 μm) ou la sous partie d'entre elles qui sont de diamètre inférieur à 2,5 μm (les particules fines; PM2.5),
 - NOx (monoxyde et dioxyde d'azote),
 - Monoxyde de carbone : CO,
 - et hydrocarbures : HC;

les niveaux d'émission varient significativement dans leur quantité comme dans leur composition suivant le type de véhicule (diesel/essence, et en raison des normes différentes imposées aux nouveaux véhicules mis en circulation, suivant leur date de mise en service). La Figure 5 illustre la variété des limitations demandées aux véhicules suivant le pays. Le CO et le NOx sont très majoritairement issus du trafic routier. Visàvis d'une régulation mise en place sur autoroute, les niveaux émis, en première approximation, dépendent uniquement des kilomètres parcourus.

- Les pollutions hors échappement :
 - o Liées à l'usure du véhicule, en particulier les freins.
 - La remise en suspension des particules présentes sur la chaussée au moment du passage des véhicules. Celle-ci dépend très significativement de la météorologie, les pluies « lessivant » la surface de roulement.

Suivant le polluant, l'une ou l'autre de ces sources sera prépondérante.

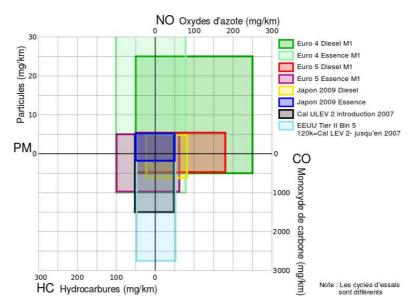


Figure 5 : Comparaison des valeurs limites d'émissions des voitures dans l'Union Européenne, au Japon et aux Etats Unis (source :

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3e/Vehicles emissions standards in EU%2C USA and Japan-fr.svg)

Dans le présent rapport, on s'intéresse à la manière dont les régulations appliquées sur les autoroutes urbaines peuvent réduire ou augmenter la **pollution émise globalement** par ces autoroutes. On ne s'intéresse donc pas à la prévision des niveaux relevés en un point du réseau. Cette prévision est basée sur la prise en compte de la propagation dans l'air, à laquelle nous ne nous intéressons pas ici⁴.

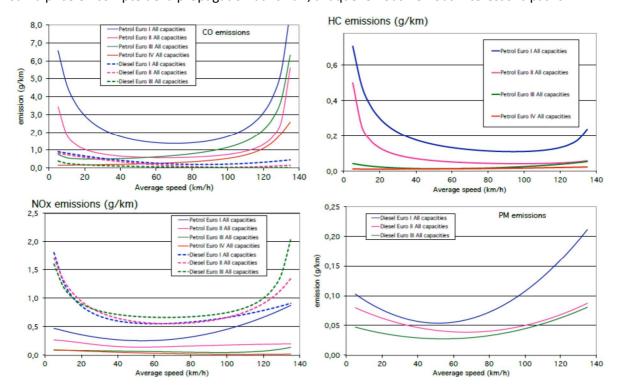


Figure 6 : Courbes d'émission à l'échappement types de la méthode Copert4 : CO et NOx (tous types de voitures essences et diesel), HC véhicules essence, PM véhicules diesel. (Source : Rapport MOCoPo 7.1).

Comme on peut le constater sur la figure ci-dessus, les niveaux d'émissions par kilomètre parcouru à l'échappement des polluants réglementés suivent, en fonction de la vitesse moyenne, une courbe en « U ». C'est-à-dire qu'ils sont émis significativement plus lorsque la vitesse moyenne est faible ou forte. C'est dans la gamme de vitesses comprises entre 40 et 100 km/h, qu'ils sont le moins émis pour une distance parcourue constante, avec toutefois d'importantes variations d'un polluant à l'autre, certains étant émis plus fortement dès que la vitesse est inférieure à 40 km/h.

Ceci veut dire qu'une mesure d'exploitation visant à demande constante à augmenter la vitesse des trajets automobile sur réseau périurbain n'aura d'effet que si la vitesse avant la mesure est inférieure à 40, voire 20 km/h. Le déterminant principal des taux d'émissions à l'échappement est le nombre de kilomètres parcourus.

Il faut noter que les courbes ci-dessus mettent bien en évidence que suivant la motorisation du véhicule (essence ou diesel) et à l'intérieur de chaque classe, suivant la norme à laquelle le véhicule est associé, le niveau d'émission à vitesse constante sera très différent (à titre d'exemple on peut analyser la courbe du NOx pour la vitesse de 40 km/h à laquelle les moteurs diesels émettent environ 0,6 g/km alors que les moteurs essence les plus récents –norme Euro IV—émettent moins de 0.1 g/km).

De ceci il découle que la composition du parc circulant est un élément déterminant de la pollution émise par des véhicules circulant en une portion du réseau, pour un niveau de vitesse et de débit identiques. Le parc estimé au niveau national semble assez représentatif. En effet, la partie 8.1.4.1 du rapport 7.2 de MOCoPo met en évidence une très légère amélioration de la prévision des niveaux

_

⁴ Dans le cadre de MOCoPo la prévision de la dispersion a été réalisée. Elle est présentée dans le rapport 7.2,

observés (après diffusion) si on prend en compte le parc identifié à Grenoble plutôt que le parc national.

Suivant les polluants, la part due aux émissions à l'échappement est plus ou moins importante sur la part totale due au trafic. Pour les NOx qui sont issus uniquement de la combustion, la part des polluants issus de l'échappement est la seule à prendre en compte et le modèle COPERT utilisé ci-dessus est réputé fiable. On peut donc se baser uniquement sur la courbe précédente (à parc constant).

Par contre, pour les particules : PM10 (particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 μ m) ou la sous partie d'entre elles qui sont de diamètre inférieur à 2,5 μ m (les particules fines ; PM2.5), la part hors échappement est plus importante. Dans le cadre de MOCoPo, nous avons estimé qu'à Echirolles les émissions hors échappement de PM représentent environ la moitié de la part des particules reçues par ce capteur qui proviennent du trafic autoroutier voisin (c'est-à-dire en extrayant le fond urbain).

Si on revient aux courbes issues de Copert4 présentées ci-dessus, il est important de préciser que lorsque l'on parle de vitesses moyennes, on parle en réalité de vitesses moyennes d'itinéraire. En effet, ces niveaux ont été mesurés sur des cycles de conduite établis pour reproduire, entre autres caractéristiques, les vitesses et accélérations des usagers au fur et à mesure de la réalisation du trajet type. Ainsi, un cycle de vitesse moyenne 50 km/h peut en réalité correspondre à un démarrage à froid, puis à accélération vers une vitesse de 80 km/h, qui est maintenue pendant une certaine portion du trajet, puis une décélération pour arrêter le véhicule. Or, les vitesses moyennes qui sont mesurées par les boucles sur le réseau d'autoroutes urbaines sont calculées en un point, sur l'ensemble des véhicules qui circulent sur ce capteur pendant une période donnée. La notion de vitesse moyenne dans Copert4 est donc une vitesse moyenne d'itinéraire pour un véhicule isolé, alors que dans les données que l'on recueille, on parle de vitesse moyenne au cours du temps de tous les véhicules franchissant un point particulier du réseau.

Ces différences fondamentales de définitions de la vitesse moyenne ont sans doute des implications sur l'estimation des niveaux de pollutions, mais pour l'instant et à notre connaissance, ces implications sont imparfaitement explorées.

Après cette présentation des mécanismes globaux à l'œuvre dans les émissions de polluants réglementés, nous pouvons maintenant examiner comment les niveaux émis dépendent des conditions de réalisation des déplacements.

B. Dépendance des émissions aux conditions de réalisation des déplacements

a) Dépendance aux kilomètres parcourus

Si les vitesses et le parc circulant restent les mêmes, augmenter la distance parcourue augmente d'autant les émissions. Ce facteur est déterminant.

b) Dépendance à la variabilité des vitesses

Dans le cas des mesures individuelles réalisées sur l'entrée Est de Lyon (cf. Figure 4), on constate que la variabilité des vitesses est relativement élevée en congestion. Se pose alors la question de savoir, dans un flux dont la vitesse moyenne est inférieure à 50 km (ce qui correspond à de faibles niveaux d'émissions de NOx) s'il y a une part importante de véhicules qui ont une vitesse inférieure à 20 km/h, vitesses pour lesquelles les niveaux d'émissions stabilisés sont plus importants.

Une analyse fine montre que peu de véhicules, parmi les 380 qui sont passés sur le capteur de l'A42 (déjà utilisé pour faire la Figure 4) pendant les 6 minutes de l'heure de pointe du matin du 23 avril 2009 où la vitesse moyenne était de 35 km/h, ont une vitesse inférieure à 20 km/h: un peu moins de 1%. Cette analyse montre également que très peu de véhicules longs sont présents dans la circulation observée à cette période, et qu'aucun ne pratique une vitesse inférieure à 20 km/h. On peut donc estimer que ce jour-là les vitesses inférieures à 20 km/h ne sont pas responsables d'une éventuelle élévation du niveau de pollution significative au voisinage de ce capteur de l'A42.

Néanmoins, il semble potentiellement utile de mener une analyse croisée des valeurs individuelles de vitesses et des niveaux de pollution en bord d'autoroute, sur une période plus longue.

Nous l'avons vu, la prise en compte, dans l'estimation des émissions, de la variabilité des vitesses pratiquées par les automobilistes est généralement réalisée au travers de cycles de conduite représentatifs des conditions de réalisation des trajets en automobile. Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas de cycle reproduisant les phénomènes d'accordéon qui sont responsables de la variabilité des vitesses en congestion.

Les outils de simulation microscopique semblent être, par construction, beaucoup plus aptes à reproduire l'effet de ces variabilités interindividuelles des vitesses. Cependant, ils reposent sur des modèles de trafic qui ont été développés pour reproduire correctement les mécanismes macroscopiques du trafic : apparition de la congestion, propagation des files d'attentes ... Ceci n'implique pas d'être capable de reproduire très finement la dynamique des véhicules (accélérations, décélérations...). Des travaux récents (Veira da Rocha, 2013) ont montré que l'effet de l'erreur commise sur la reproduction fine de la dynamique en simulation sur l'estimation de la consommation est très important. On peut en déduire qu'il est sans doute également important lorsqu'il s'agit non plus de consommation mais d'estimation des pollutions. Néanmoins, des outils de simulation des émissions associées au trafic existent (Ahn & Rakha, 2013), (Ragione, et al., 2009). Cependant faute de preuve interne à l'équipe de leur capacité à être utilisés pour prédire les émissions en toute confiance, nous n'en recommandons pas l'usage, pour l'instant.

3. Insécurité routière

A. Méthodes disponibles

Il est difficile, à partir des données présentées sur le site de l'ONISR pour les années récentes (ONISR, 2014), de faire la différence entre les autoroutes urbaines et les autres voiries, dans la mesure où les accidents sont classés par :

- Autoroutes;
- Routes nationales;
- Routes départementales ;
- Voies communales ;
- Hors réseau public ;
- Parkings publics ;
- Bretelles;
- Autres voies.

Cette classification est donc associée non pas à la nature de la voie mais à la puissance publique (commune, département, Etat) ou privée qui possède la voie. Ainsi, nous ne pouvons pas établir un nombre d'accidents par kilomètres parcourus sur les autoroutes urbaines, qui sont la propriété de l'Etat, du département ou de la commune suivant les cas...

Cependant, l'analyse de l'accidentologie rapportée aux kilomètres parcourus sur les autoroutes comparée à celle constatée sur l'ensemble du réseau montre que la sécurité est supérieure sur ces infrastructures où les courbes sont de grand rayon et la visibilité importante : 20 % des kilomètres parcourus et moins de 5 % des accidents toutes gravités confondues, ainsi que le montre la figure suivante (ONISR, 2000).

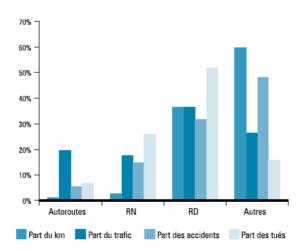


Figure 7 : Parts relatives du kilométrage de réseau considéré, du nombre de kilomètres parcourus, des accidents, des tués par accident de la route. (Source : (ONISR, 2000)).

Combattre l'insécurité routière n'est donc pas classiquement un objectif prioritaire pour les exploitants, privés ou publics, des réseaux d'autoroutes. Nous nous sommes livrés cependant à l'analyse des liens entre conditions de circulation et accidentologie car lutter contre les deux externalités que nous avons examinées précédemment ne peut se faire au prix d'une diminution de la sécurité routière.

Il existe deux grandes familles de méthodes permettant de lier les conditions de trafic à l'insécurité routière. La première consiste à utiliser la simulation, la seconde consiste à faire des analyses statistiques des données disponibles.

a) Simulations dynamiques

Nous n'avons pas retenu dans le cadre de ce rapport la méthode basée sur la simulation de trafic, qui ne nous parait pas apte, dans l'état actuel des recherches, à produire des estimations fiables de probabilités de survenue d'un accident.

En effet, les simulations dynamiques du trafic reposent dans leur très grande majorité sur l'hypothèse que la distance de sécurité est maintenue entre véhicules, ce qui les empêche d'être utilisées dans le cas des accidents. Des outils de simulation font actuellement l'objet de développements spécifiques visant à l'estimation du risque routier. Ils considèrent qu'il est possible que le conducteur ne respecte pas sa distance de sécurité⁵.

La question de la méthodologie de validation du pouvoir prédictif d'un outil de simulation de la sécurité routière reste ouverte. Certains auteurs souhaitent se reposer sur l'observation de quasi accidents c'est-à-dire de situations qui auraient pu dégénérer en accident si une réaction de dernière minute d'un des protagonistes n'avait pas eu lieu. Cependant, il est difficile de garantir que la fraction des quasi-accidents qui donnent lieu à un accident réel est uniforme entre les différents types d'accidents (collisions arrière, chocs frontaux, ...).

Par ailleurs, à notre connaissance, les développements en faveur d'une simulation du risque routier se concentrent sur la collision lors de la conduite en file et ignorent la question du changement de voie. Or, il semblerait qu'une part importante des accidents sur autoroute survienne lors de changements de voie. Des travaux sont en cours à l'UMRESTTE, qui devraient déboucher prochainement.

⁵ On pourra sur ce sujet se reporter aux travaux conduits par Samer Hamdar de l'université Georges Washington. Voir par exemple : (Hamdar, et al., 2009).

23

Pour conclure ce point, on peut donc dire que les travaux visant à réaliser des outils de simulation dynamique du risque routier sont extrêmement récents et n'ont pas pour l'instant, à notre sens, fourni de résultats utilisables opérationnellement.

b) Analyses statistiques

La plus forte difficulté en ce qui concerne l'estimation de l'impact de la gestion du trafic sur la sécurité routière par analyse statistique consiste à relier les données d'accidents à des données de trafic précises à la fois dans le temps et dans l'espace.

A notre connaissance, dans la littérature, une des rares analyses cherchant à lier les conditions de trafic et les accidents rapportés par les patrouilleurs des autoroutes (qui comprennent seulement 15% d'accidents corporels) est présentée dans (Martin, 2002). L'auteur a rapproché des données de trafic collectées sur des autoroutes interurbaines avec les données d'accidentologie sur ces mêmes infrastructures pendant plusieurs années. Cette durée de collecte est impérative pour que le volume de données d'accidents permette une représentativité statistique. Pour cette étude, les données de trafic étaient agrégées sur des périodes d'une heure.

Les informations dont on dispose, en France, pour caractériser les accidents (nature du choc, nombre de véhicules impliqués, nature des lésions des personnes impliquées, type de voies, etc...) ont été saisies, pour l'écrasante majorité d'entre elles, par les forces de l'ordre au travers des bulletins d'analyse d'accident corporel (BAAC)⁶.

La connaissance de l'instant de l'accident enregistré dans les BAAC est assez peu précise, avec typiquement une erreur de quelques minutes. Les données de trafic analysées dans le cadre du rapprochement de données de trafic et de données d'accidentologie sont typiquement agrégées sur des durées d'une heure. Or, les conditions de trafic d'une autoroute périurbaine peuvent varier considérablement pendant une période d'une heure. De plus, dans les variables associées aux conditions de trafic, ce n'est pas uniquement la connaissance de données moyennes qui permettra de comprendre la survenue d'incident ou d'accident.

Au contraire, des variables caractérisant les distributions (la variance et surtout les valeurs extrêmes) peuvent sans doute être liées à un plus grand risque routier. Par exemple des valeurs faibles des interdistances, à attention égale du conducteur, peuvent induire des survenues plus fréquentes ; des différences de vitesses importantes entre deux véhicules successifs peuvent expliquer une plus grande gravité d'une éventuelle collision, etc... La moyenne des vitesses, ainsi que le débit moyen ne peuvent pas refléter correctement la probabilité d'observer ces valeurs qui pourraient utilement être analysées conjointement avec les données d'accident⁷.

Par ailleurs, le plus souvent, les données de localisation enregistrées dans les BAAC sont peu précises. Elles permettent de connaître le nom et la nature de la voie (autoroute, route nationale etc...) mais pas la configuration géométrique précise (sur la bretelle d'entrée d'un convergent à 150 mètres du début de la ligne discontinue par exemple). De plus, même si cette information précise sur la localisation de l'incident était disponible, pour la lier avec une information fiable sur les conditions de trafic, il faudrait pouvoir disposer de capteurs de données de trafic à proximité (une à deux centaines de mètres de distance au plus). Or il se trouve que la distance entre deux capteurs (boucles

-

⁶ Il existe également d'autres moyens d'avoir accès à des informations sur les lésions, dans le cadre du registre notamment, qui procède avec une approche centrée sur les personnes entrant dans les services d'urgence.

⁷ Notons au passage qu'un exploitant n'aurait qu'à faire une petite modification des commandes envoyées aux boucles et à prévoir une capacité de stockage dix fois supérieure pour stocker des valeurs caractérisant les distributions relevées chaque heure (par exemple, les déciles des vitesses). A l'heure de la réduction des coûts du stockage, ceci devrait être envisagé.

électromagnétiques) est au minimum de l'ordre de 500 m sur autoroutes urbaines (soit très significativement moins que sur autoroutes interurbaines où elle est de 10 à 30 km).

Pour ces deux raisons (densité des capteurs de trafic et agrégation des données de trafic sur des périodes longues), il est difficile de faire une analyse des accidents pour déterminer la probabilité de survenue d'un accident en fonction des conditions fines de circulations locales. Néanmoins, à dire d'expert, et au vu des quelques études d'analyse statistiques de données globales, on peut faire état de tendances.

B. Dépendance de l'insécurité routière aux conditions de réalisation du déplacement

a) Dépendance aux kilomètres parcourus

En première approximation, le risque routier est proportionnel à la distance parcourue. Si au lieu d'un itinéraire court on conseille aux usagers un itinéraire deux fois plus long, à conditions de trafic équivalentes, on multiplie par deux la probabilité de chaque usager d'avoir un accident au cours de son trajet.

b) Dépendance au débit

Dans l'étude précédemment citée (Martin, 2002) l'auteur base son travail sur une recension de tous les accidents intervenu sur le réseau d'Autoroutes du Sud de la France, c'est-à-dire les accidents matériels et corporels (ces derniers ne représentant que 15 % du total).

L'auteur a constaté que le nombre d'accidents rapportés aux kilomètres parcourus est linéairement croissant en fonction du débit observé pendant l'heure concernée par l'accident. Ceci est vrai pour les débits correspondant à des conditions très fluides à fluides. Lorsque le débit s'approche de la valeur critique (c'est-à-dire dans un régime pré-congestionné), alors la relation n'est plus linéaire mais une tendance quadratique est observée.

c) Dépendance aux vitesses pratiquées

Un des premiers auteurs qui a établi une relation entre l'aggravation du taux d'accidents graves et mortels par kilomètres parcourus d'une part et l'augmentation de la vitesse pratiquée est Nilsson. On trouvera dans (ONISR, 2014) une fiche synthétique de ces travaux qui explique que le risque d'accident corporel est augmenté en fonction d'une augmentation de la vitesse à la puissance 2 alors que le risque d'accident mortel, lui, est augmenté à la puissance 4. Ceci est dû à la proportionnalité entre la gravité des accidents et l'énergie cinétique du choc. Un article récent (Viallon & Laumon, 2013) a confirmé cela pour les accidents mortels. La figure suivante est une simple illustration de la formule présentée dans (ONISR, 2014).

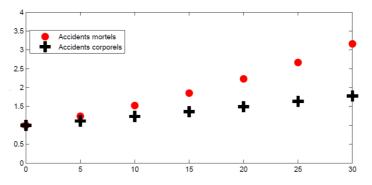


Figure 8 : augmentation du risque d'accidents mortels et corporels en fonction de l'augmentation en km/h de la vitesse moyenne par rapport à une vitesse moyenne de base de 90 km/h.

Il ne semble pas exister à notre connaissance d'étude ciblant spécifiquement l'impact des vitesses moyennes au sein des régimes congestionnés. Il a été montré dans (Golob & Recker, 2004) que la probabilité de survenue d'une collision arrière dans des conditions de trafic congestionnées est plus

importante que la moyenne. Cependant, comme ces collisions sont indifférenciées entre celles qui ont lieu en amont (collision de queue de bouchon) ou à l'intérieur de la congestion, nous ne pouvons confirmer que la signalisation des bouchons présents en aval, souvent effectuée par les exploitants, permette de réduire le risque de collisions de fin de bouchon.

d) Dépendance aux changements de voie

Il semble raisonnable de penser que plus le nombre de changements de voie est important, plus la probabilité de survenue d'un accident sera forte, étant donné la forte proportion d'accidents survenant lors de ceux-ci. Cependant, comme nous l'avons vu plus haut peu de données sont disponibles, mais les travaux en cours à l'UMRESTTE devraient déboucher prochainement.

e) Récapitulatif des effets sur la sécurité routière des différentes modifications des conditions de trafic

Le tableau suivant présente une synthèse des éléments présentés ci-dessus. A noter qu'il convient de bien différencier le risque de collision de la gravité moyenne des accidents. L'objectif d'améliorer la sécurité routière passe en effet par deux actions conjointes :

- Diminuer le nombre d'accidents survenant sur les autoroutes urbaines à demande de déplacement constante;
- Et diminuer la gravité de chaque accident pour diminuer les effets de l'insécurité routière : réduire le nombre total de tués, le nombre de blessés graves, le nombre de blessés légers.

Nature de l'évolution des conditions de circulation	Effet probable sur le risque de collision	
Augmentation des km parcourus	Augmentation du risque	
Augmentation des vitesses pratiquées en régime fluide	Augmentation significative du risque et augmentation encore plus sensible de la gravité	
Diminution du nombre de changement de voies	Diminution du risque	
Diminution des différences de vitesses pratiquées par les différents usagers	Diminution du risque	

Tableau 1 : Lien entre l'évolution des conditions de circulation et l'insécurité routière. Source : (Golob & Recker, 2004)

f) Implication de l'insécurité routière sur les conditions de trafic

Chaque accident limite pendant une période plus ou moins longue la disponibilité de l'ensemble des voies à la circulation. Un des participants à la réunion d'octobre 2013 a déclaré que typiquement les accidents sont responsables du quart de la congestion observée sur les autoroutes périurbaines.

Nous verrons plus loin comment en réduisant la durée de la gêne à la circulation après un accident, l'exploitant peut générer des gains très significatifs en termes de congestion des autoroutes périurbaines.

III. Régulation des autoroutes périurbaines

Nous avons vu dans la partie II.1.a) que la congestion résulte toujours d'un excès à un instant donné de la demande par rapport à l'offre.

Depuis les débuts de la gestion des autoroutes urbaines, les exploitants ont comme objectif principal outre la sécurité, le maintien de la fluidité des conditions de circulation. Ils ont donc cherché à réduire la congestion soit en réduisant la demande soit en augmentant l'offre. Ce chapitre sera tout naturellement divisé en deux parties. Le tableau ci-dessous présente les différentes régulations étudiées.

En première partie, on examinera les actions sur la demande ;

- Celles qui visent à réduire la demande cumulée sur une journée (tarification) ;
- Celles qui ont pour objectif de mieux la répartir dans le temps en écrêtant les pics.
- Enfin celles qui répartissent la demande dans l'espace en utilisant tout le réseau autoroutier disponible et en particulier les itinéraires alternatifs à l'itinéraire le plus congestionné.

La seconde partie sera consacrée aux régulations de l'écoulement qui visent toujours à maintenir l'offre à son niveau maximal ou à mieux la répartir. Nous décrirons ainsi successivement la régulation d'accès (qui consiste à traiter le débit des bretelles d'entrées), la régulation des vitesses maximales autorisées, l'interdiction de dépassement des poids lourds et enfin la gestion dynamique des voies.

Catégorie	Action	Mécanisme simplifié de fonctionnement de la régulation	
Régulation de l'heure de départ et de l'itinéraire du trajet :	Information pendant le trajet sur les conditions en aval	Agit sur l'étalement spatial de la demande	
répartition de la demande de	Information avant le départ	Agit sur l'étalement temporel de la demande	
déplacement (partie III.1)	Tarification dynamique en fonction de la congestion	Agit sur le niveau total de la demande, sur son étalement spatial et / ou temporel.	
Régulation de l'écoulement : maintien voire augmentation	Régulation des accès	Maintient l'offre le plus longtemps possible au niveau hors congestion. Uniformise la demande dans le temps (permet de gommer les micro-variations de l'ordre de la minute).	
ponctuelle de l'offre (partie III.2)	Régulation dynamique des vitesses	Utilisée hors congestion, permet théoriquement de retarder son apparition en uniformisant le flux avec une vitesse globale plus faible	
	Interdiction dynamique de dépassement des poids lourds	Permet de maintenir une meilleure capacité, mais peut rarement être utilisée sur réseau périurbain où la demande des déplacements poids lourds est relativement plus faible en période de pointe	
	Gestion dynamique des voies	Permet d'augmenter ponctuellement la capacité pour les déplacements les plus demandeurs.	

Tableau 2 : Présentation des différentes actions de régulation dynamiques que l'on peut appliquer aux autoroutes urbaines.

Cependant, avant de passer à ces deux parties, consacrons quelques lignes à l'une des actions de gestion des autoroutes les plus efficaces : l'intervention rapide pour rétablir la capacité normale de la voie lorsqu'elle est limitée par une cause extérieure. Cette méthode est utilisée dans deux cas : intervention planifiée ou incident imprévisible.

Les interventions planifiées correspondent aux travaux, aux manifestations, etc... Les exploitants recherchent un compromis pour que ces réductions de capacité aient lieu pendant des périodes de moindre demande : nuits, week-ends ... ou, pour les manifestations, sur des parties du réseau soumises à une demande plus faible.

Les accidents corporels se divisent en accidents graves, avec des blessés graves ou des tués, et accidents légers, avec uniquement des blessés légers. Il faut considérer également les accidents matériels et les pannes. L'ensemble de ces quatre évènements nécessitent l'intervention de véhicules spéciaux pour retirer les véhicules immobilisés et éventuellement celle des services de secours.

Plus cette intervention sera rapide, plus tôt l'offre maximale de la voie sera rétablie. Si la demande est supérieure à l'offre résiduelle alors une congestion apparaît et croît jusqu'à ce que les véhicules accidentés ou en panne soient évacués. On montre que réduire la durée de l'incident de moitié diminue le temps total perdu par un facteur quatre. Le nombre de véhicules concernés et la longueur maximale de la file d'attente sont réduits de moitié. C'est donc une action d'exploitation particulièrement efficace sur la congestion.

Les équipements nécessaires à la diminution de la durée d'un incident sont ceux classiquement disponibles sur les voies rapides urbaines :

- Boucles électromagnétiques ou autre système de recueil de données de vitesse qui permet de comparer la vitesse actuelle d'une section à la vitesse habituelle;
- Caméras qui permettent de confirmer rapidement qu'il s'agit d'un accident.

En termes d'organisation, la diminution de la durée d'intervention passe par une bonne gestion des contacts avec les dépanneuses et les forces de l'ordre ainsi que les véhicules de secours.

1. Optimisation de la répartition de la demande dans l'espace et dans le temps

Nous l'avons vu plus haut, mais le lecteur (magnanime) nous pardonnera cette répétition, toute période où la demande est supérieure à l'offre génère une file d'attente. Cette file d'attente (voir figures 1.a et 1.b) perdure au-delà de la période de sous capacité, lorsque la demande redevient inférieure à l'offre, pendant une durée que l'on peut déterminer en connaissant le nombre de véhicules en file d'attente lors de son extension maximale, la capacité et demande après la pointe.

L'apparition de moyens d'information des usagers a fourni des leviers ; soit pour mieux étaler la demande dans le temps, soit pour mieux la répartir dans l'espace. Par ailleurs en augmentant le prix du déplacement par des péages urbains par exemple, dynamiques au cours de la journée ou non, on peut conduire les usagers à utiliser un mode autre que la voiture individuelle pour se déplacer à l'heure de pointe.

a) Information et guidage des usagers après leur départ

Une fois que les usagers ont commencé leur trajet, on ne peut plus étaler la demande que dans le temps. Le principe de cette régulation est donc de pousser l'usager à utiliser d'autres itinéraires que les itinéraires congestionnés. La première méthode est d'utiliser les outils d'information de l'usager pour lui annoncer les conditions de circulation sur les itinéraires situés en aval du point d'information. Il s'agit d'une information descriptive au sens que l'on fournit une information, l'usager réalise ensuite son choix en connaissance de cause. Si l'un des deux itinéraires présente de très mauvaises conditions de circulation, on peut recommander (plus ou moins fermement) aux usagers d'utiliser l'autre itinéraire. Il s'agit alors d'information prescriptive ou de guidage.

Généralement, l'itinéraire le plus court est également le plus chargé. Le guidage revient donc, dans l'immense majorité des cas, à renvoyer les usagers sur un itinéraire plus long. Rappelons que toutes choses égales par ailleurs (composition du parc circulant, conditions de trafic et comportements des

usagers), ceci revient à augmenter le niveau de pollution et l'insécurité proportionnellement à l'allongement des trajets.

Le déploiement de dispositifs collectifs d'information des usagers fut une grande préoccupation des exploitants dans les années 1990-2000 : Panneaux à Messages Variables, radios d'information dédiées ou flashs d'information routière sur des radios locales font partie de ces dispositifs. On a pu montrer (Buisson & Ladier, 2007) que l'absence d'information sur les PMV semblait avoir, sur un jour donné, augmenté le temps total perdu par les usagers. Des recherches sur un jeu de données plus étendues devraient permettre de continuer ces investigations.

Depuis les années 2010, des dispositifs individuels se généralisent et permettent l'accès à une information temps réel de manière individuelle à bord du véhicule. Sans en faire une liste détaillée, distinguons deux grandes familles :

- Dispositifs d'information dédiée : dispositifs spécifiques de localisation GPS doublés d'un accès à une information temps réel sur les conditions de trafic ;
- Applications smartphone, qui ne nécessitent pas d'installation particulière, mais utilisent les capacités de localisation et de connexion internet de ces smartphones pour fournir une information sur les conditions instantanées de circulation.

Un des défis qui guettent les exploitants des réseaux péri-urbains est d'être capables d'interagir avec les prestataires de ces dispositifs pour savoir quels sont les conseils qu'ils donnent et continuer à pouvoir guider les usagers sur les itinéraires les moins chargés et répartir la demande dans l'espace.

b) Information des usagers avant le départ (modification de l'heure de départ)

Cette information passe par la fourniture à l'usager d'informations sur les conditions de trafic à l'instant t via des serveurs. A noter que l'information peut être donnée par l'exploitant ou par un fournisseur d'information privé. L'utilisateur, ensuite, grâce à des dispositifs connectés à Internet qu'il consulte avant son départ, peut avancer ou retarder celui-ci. Cette information permet d'étaler la pointe de demande dans le temps. Son impact sur les conditions de trafic est difficile à qualifier.

c) Tarification

Zones de tarification

La première distinction qu'il faut faire en matière de tarification porte sur la forme de la partie du réseau concernée. La tarification de l'usage des infrastructures est utilisée depuis 50 ans environ, initialement pour assurer le retour sur investissement pour les sociétés concessionnaires. En milieu urbain, cette tarification s'applique à des arcs particuliers : tunnels, ponts

Une variante de cette tarification d'un arc est constituée par les HOT. Il s'agit d'une évolution des "High Occupancy Vehicles lanes" (HOV). Initialement, les HOV ont été conçues pour réserver, sur une autoroute comprenant plus d'une voie, une voie à la circulation de véhicules dans lesquels prenaient place plus d'un passager, pour favoriser le co-voiturage. Ces voies sont généralement sous utilisées, et il est donc apparu avantageux d'en autoriser l'accès à des conducteurs isolés qui payent pour pouvoir utiliser ces voies, qui deviennent ainsi des HOT ("High Occupancy Toll lanes").

La tarification a été aussi conçue comme un moyen de limiter le trafic dans certaines zones et de faire comprendre à l'usager que son utilisation du réseau induit un ensemble d'externalités négatives que la société dans son ensemble supporte. Elle s'applique donc maintenant à des réseaux urbains (par exemple, Londres, Singapour, ...).

Temporalité de la tarification

On distingue également la tarification uniforme dans le temps de la tarification variable. A l'intérieur de la classe des tarifications variables, il faut distinguer la tarification variable à horaires fixes de celle qui dépend de la congestion observée sur la zone.

La tarification uniforme consiste à instaurer un péage sur une portion du réseau. L'exemple historique est le péage autoroutier longtemps pratiqué uniquement sur les portions interurbaines. Actuellement certaines parties du réseau périurbain sont concédées et un péage fixe dans le temps est demandé pour emprunter ces infrastructures.

La tarification modulée en fonction d'horaires fixes est utilisée en France sur l'A1 et l'A14 au moins. Il s'agit là encore de réduire un usage trop intense (cette fois en heure de pointe) qui conduit à l'apparition de congestions. Néanmoins, il ne s'agit pas de réagir en temps réel lorsque cette congestion apparait. C'est aussi le cas de certains péages de zones (par exemple à Londres, le paiement est requis de 7h à 18h du lundi au vendredi).

La tarification dynamique en fonction de la congestion est à notre connaissance utilisée actuellement uniquement sur certaines des HOT décrites ci-dessus. Elle consiste à fixer un prix d'autant plus élevé que les temps passés sur l'infrastructure sont importants, de manière à dissuader une part d'autant plus importante des usagers d'utiliser la HOT.

Tarifications applicables sur le réseau périurbain dans le cadre de la régulation dynamique de la demande

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des différentes tarifications appliquées de par le monde. Les cases surlignées en bleu correspondent à celles qui peuvent être utilisées par l'exploitant du réseau périurbain pour agir sur la dynamique de la demande en induisant une meilleure répartition dans le temps.

		Types d'infrastructure		
		Un arc (tunnel, pont,) d'un réseau d'AU	Une voie (HOT) d'une AU	Une zone de la ville
ı péage au temps	Tarif uniforme quelle que soit l'heure			
du du	Tarif modulé avec des horaires fixes			
Evolution	Tarif variable en fonction de la congestion observée			

Tableau 3 : Différents types de tarification urbaine en fonction de la zone de l'espace et de la modulation dans le temps du péage. On a surligné en bleu celles qui peuvent s'appliquer sur un réseau d'autoroutes urbaines (AU) dans le cadre de la régulation dynamique.

La tarification variable en fonction de la congestion peut être envisagée pour réduire la congestion du réseau d'autoroutes périurbaines. Néanmoins, la mise en place de ce type de régulation s'accompagne nécessairement de la mise en place de moyens dédiés de recueil des péages (système de télépéage, par exemple), ainsi que d'une campagne fine de communication pour justifier auprès des usagers l'instauration d'une tarification sur une infrastructure auparavant gratuite.

2. Régulations dynamiques de l'écoulement

Pour compléter les informations données ci-après, le lecteur intéressé pourra utilement se reporter à (Duret, 2014) et/ ou au site (CEREMA, 2014). Chacune des quatre méthodes de régulation présentées dans cette partie vise à augmenter l'offre de l'infrastructure soit d'une manière directe comme la gestion dynamique des voies —qui augmente ponctuellement l'offre— soit d'une manière indirecte en agissant pour que les conditions de trafic permettent de maximiser l'offre.

A. Régulation d'accès

Le principe consiste à maximiser l'offre de l'infrastructure en maintenant le plus longtemps possible une situation fluide au droit de la zone de l'autoroute où la rampe d'accès s'amenuise et disparaît, en aval d'une entrée d'autoroute (point P de la Figure 9). En effet, comme nous l'avons vu page 16, il est admis dans la littérature qui rapporte de nombreux cas expérimentaux que si la congestion s'installe en P (voir Figure 9), la capacité en ce point est de 3 à 20 % inférieure à ce qu'elle est en situation fluide. Ce phénomène, appelé "capacity drop" ou chute de capacité, semble dû au fait que le flux, lorsqu'il est congestionné, est à une vitesse faible et que son accélération est progressive, avec une augmentation graduelle de la distance entre véhicules. Une analyse plus fine des données de trajectoires de MOCoPo permettra de corroborer ce fait.

Dans l'objectif de maintenir la capacité nominale, dès que la demande de trafic sur la bretelle (entrée *E2*) est supérieur à un seuil, on applique un cycle de feux à l'aval de cette bretelle (grâce au feu qui y est placé). Une file d'attente se forme alors sur la bretelle. Le feu étant situé en *F*, en amont de la zone d'accélération, on garantit que la vitesse des véhicules venant de la bretelle soit suffisante pour que leur insertion dans le trafic de la section courante ne perturbe pas ce trafic, et ne génère pas de file d'attente en P. On maintient ainsi un fonctionnement optimal, car si la file d'attente se formait en *P* la capacité serait inférieure (*Q2* au lieu de *Q1*) et tous les véhicules (de la bretelle ou de la section courante) seraient impactés.

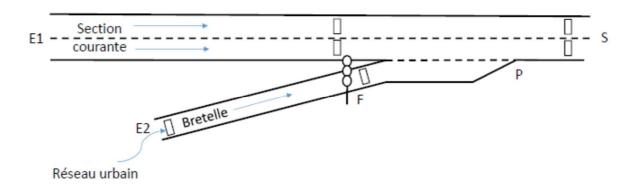


Figure 9 : Représentation d'une entrée d'autoroute (dite aussi convergent) avec dispositif de régulation d'accès. Les rectangles représentent les boucles électromagnétiques, destinées à mesurer le débit. La boucle à proximité de l'entrée E2 est destinée à garantir que la file d'attente ne s'installe pas sur le réseau urbain.

Lorsque la file d'attente sur la bretelle est trop longue et qu'elle menace de remonter sur le réseau urbain, elle est détectée par la boucle électromagnétique placée en début de bretelle (près de *E1* sur le schéma précédent). Le cycle du feu placé à l'autre extrémité de cette bretelle en *F* est alors réglé pour que les périodes de vert soient plus longues et que la file d'attente se vide progressivement. Si la demande sur la bretelle est élevée, le cycle du feu *F* devient de plus en plus long et on peut facilement basculer en congestion de la section courante, c'est-à-dire dans le mode de fonctionnement sans régulation d'accès.

Par ailleurs, le fait d'installer sur la bretelle un feu dont le cycle est généralement court (voir plus loin) permet d'uniformiser les entrées et d'éviter les à-coups de la demande. En effet, lorsque la bretelle

est située en aval d'un carrefour à feu urbain (ce qui est très généralement le cas), dont le cycle est par exemple de 2 minutes, on a typiquement un trafic fort (un véhicule toute les 2 secondes) pendant par exemple 40 secondes (ce qui correspond à 20 véhicules par cycle de 2 minutes).

Le choix du cycle du feu est primordial. Dans le cas ci-dessus, si au lieu d'avoir un débit de 20 véhicules pendant 40 secondes, puis 0 véhicule pendant 80 secondes, on a un flux continu d'un véhicule toutes les 6 secondes, le débit total est le même, mais le trafic de la section courante est beaucoup moins perturbé. C'est l'effet de l'écrêtage de la demande.

Cet effet sera maximisé si un véhicule seulement est autorisé à passer à chaque passage au vert (réglage en « goutte à goutte »). Cependant, comme la durée du rouge minimal est fixée par la réglementation à 2 secondes et que 2 secondes de vert sont nécessaires au franchissement d'un feu par un véhicule, on ne peut pas descendre en dessous d'un cycle de 4 secondes avec le passage d'un véhicule à chaque cycle. De ce fait, le réglage en goutte à goutte sera utilisable pour un débit horaire inférieur à 900 véhicules par heure (=3600 secondes/4 secondes).

Pour régler le feu placé en *F* (durée du cycle et durée du vert) plusieurs algorithmes existent. Un des algorithmes les plus répandus dans le monde pour la régulation d'accès est ALINEA (Papageorgiou, et al., 1991). Cet algorithme vise à ce que le flux qui s'écoule de la bretelle soit adapté de manière dynamique à la capacité résiduelle de la voie principale.

Des versions ont été développées par la suite pour gérer plusieurs accès de manière coordonnée. La régulation dynamique des accès est, à notre sens, l'outil le plus prometteur parmi ceux à la disposition des exploitants des voieries urbaines de type autoroutier.

B. Régulation dynamique des vitesses maximales autorisées

Il existe deux types de régulations de vitesse maximale autorisée : celle qui vise à maintenir le trafic fluide à une vitesse supérieure à la vitesse de basculement en congestion tout en maximisant la capacité et celle qui vise à créer une congestion (grâce à une vitesse maximale faible) en un lieu précis, avec pour objectif de limiter le débit sortant de cette zone.

a) Régulation des vitesses pour un trafic fluide

En France, la limitation dynamique de la vitesse maximale autorisée est utilisée depuis une dizaine d'années sur des autoroutes interurbaines (A7 entre Vienne et Orange notamment). Sur ces réseaux, elle a clairement montré son efficacité à retarder l'apparition de la congestion. En vertu de la chute de capacité en congestion, le bénéfice sur les temps totaux perdus est immédiat.

Le mode de fonctionnement de cette régulation, tel qu'il été analysé dans (Duret, 2010), peut être simplifié comme suit. Sur une autoroute interurbaine, lorsque la vitesse maximale autorisée est de 130 km/h, il existe une part des véhicules qui ne peuvent circuler à cette vitesse, pour des raisons mécaniques (puissance du moteur), réglementaires (transports de marchandises par exemple) ou de choix individuel. Ces véhicules occupent la voie de droite, où ils circulent à, par exemple, 80 km/h. Les conducteurs des véhicules légers sont, eux, désireux de circuler à une vitesse la plus proche possible de la vitesse maximale.

Lorsque la vitesse maximale est de 130 km/h, si le trafic est très peu dense, les conducteurs peuvent choisir de circuler sur la voie de droite et facilement effectuer la manœuvre de dépassement nécessaire lorsqu'ils sont derrière un véhicule plus lent. Lorsque le trafic se densifie, l'insertion sur la voie de gauche, nécessaire pour effectuer le dépassement, est plus difficile, les véhicules (circulant sur cette voie de gauche à 130 km/h) étant plus nombreux. Les conducteurs des véhicules légers ont donc tendance à choisir de circuler sur les voies rapides. La capacité de la voie de droite n'est ainsi pas totalement utilisée.

Lorsque la vitesse maximale autorisée est abaissée et devient proche de la vitesse pratiquée par les véhicules les plus lents, l'obstacle à utiliser la voie de droite disparaît et le trafic se répartit plus

uniformément sur les différentes voies de l'autoroute, ce qui permet d'avoir une capacité globale supérieure et ainsi de maintenir un débit fluide plus longtemps.

Cependant, cet effet d'uniformisation de la répartition de la demande de trafic sur l'ensemble des voies de l'autoroute n'est atteignable par la régulation de la vitesse que si et seulement si les usagers choisissent leur voie en lien avec cette vitesse. C'est pour cette raison que nous pensons que la régulation des vitesses n'a pas d'effet sur la capacité des autoroutes périurbaines, où le choix de voie est lié à la logique d'entrées et de sorties des véhicules de l'autoroute. Cet argument est renforcé par l'étude réalisée par le CETE de Lyon lors de la mise en place de la régulation des vitesses sur la rocade Sud de Grenoble qui n'a pu mettre en évidence aucun effet sur le trafic (CETE de Lyon, 2011). D'autres études réalisées sur l'impact de l'abaissement de la vitesse réglementaire (de manière permanente ou les jours de pollutions élevées) sur différents périphériques confirment l'absence d'impact de l'abaissement des vitesses sur la capacité des sections courantes.

Cependant, si on se situe au niveau des bretelles d'entrées, la régulation de vitesse peut avoir un effet sur le réseau périurbain. En effet, si la vitesse sur la section courante est abaissée (le trafic restant fluide), alors le différentiel de vitesse à l'insertion entre le véhicule qui vient de la bretelle et ceux qui le précèdent ou le suivent sur la section courante sera plus faible⁸. Le véhicule qui s'insère créera donc une moindre perturbation sur le trafic de la section courante.

Ceci est encore renforcé lorsque la régulation dynamique des accès est mise en place. Dans ce cadre en effet, on place le feu (situé en *F* sur le schéma précédent) à une distance plus courte du point *P*, puisque la distance nécessaire pour atteindre la vitesse de la section courante est plus faible. La distance entre *E2* et *F* qui est la longueur maximale de la file d'attente en est augmentée d'autant. Ceci permet d'augmenter la partie de l'heure de pointe pendant laquelle on activera la régulation d'accès et ainsi de réduire la durée de la congestion.

La diminution de la vitesse maximale autorisée sur les autoroutes urbaines a d'autres effets bénéfiques. Elle diminue les émissions de polluants à l'échappement (cf. Figure 6). Comme nous l'avons vu plus haut, elle diminue le différentiel de vitesse entre les véhicules de la section courante et ceux provenant de la bretelle d'entrée. En termes de sécurité routière, ce dernier point pourrait être bénéfique. En effet, ceci a probablement un effet sur l'accidentalité, bien qu'aucune étude, à notre connaissance, ne mette ceci en évidence, sans doute par défaut de statistiques suffisantes.

b) Régulation des vitesses maximales autorisées pour créer une congestion contrôlée

Dans d'autres pays (Pays Bas, USA, Australie, ...) la régulation dynamique des vitesses est aussi appliquée en amont d'une tête de bouchon. La zone de limitation de vitesse crée une congestion artificielle ce qui limite le débit qui en sort. Le principe est que ce débit soit ajusté (par la valeur de la vitesse maximale autorisée) à la capacité de la tête de bouchon Q1 qui permet de maintenir un trafic fluide.

En effet la tête de bouchon à une capacité de valeur Q1 si le trafic est fluide et de valeur Q2 inférieure si le trafic est congestionné, en vertu de la chute de capacité dont nous avons déjà parlé. En limitant la vitesse sur une zone Z située en amont de ce point on « filtre » la demande pour ne laisser passer que le débit Q1 en sortie de la zone de limitation de vitesse Z. Ainsi la congestion ne s'installe pas immédiatement en amont de P et le débit en P est la capacité du régime fluide, donc Q1. Cette congestion artificiellement créée permet d'écouler un débit supérieur à celui qui s'écoulerait en aval de la congestion si elle s'installait spontanément au point P du schéma ci-dessous.

⁻

⁸ Sauf si la régulation des vitesses crée des comportements uniformes des conducteurs sur la section courante qui sont amenés à choisir des distances inter-véhiculaires presqu'identiques. Il n'y aura pas alors d'espace plus grand que les autres entre deux véhicules successifs qui permettrait une insertion facilitée. C'est le cas rapporté par V. Knoop lors d'une conférence sur la situation aux Pays bas, où la limitation de vitesse s'associe à un contrôle de vitesse sur une portion de l'itinéraire (par identification en entrée et en sortie de l'autoroute) (Knoop, 2010).

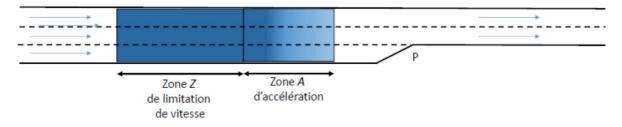


Figure 10 : Schéma de principe de la régulation de vitesse avec instauration d'une zone de limitation de vitesse forte, destinée à ce que le débit en sortant soit égal à la capacité Q1 en fluide au point 1. La zone d'accélération permet que les véhicules soient à vitesse libre en passant au point P.

Il semble que ce type de régulation dynamique des vitesses maximales autorisées n'ait pas été envisagé en France pour l'instant. Il pourrait cependant, si les problèmes d'acceptabilité par les usagers étaient correctement traités, améliorer le trafic et ce d'autant plus si la chute de capacité en congestion est importante au niveau de la réduction des voies.

C. Gestion dynamique des voies

Cette régulation dynamique consiste à ouvrir à certaines périodes de la journée (celles qui font face à une demande importante) une voie à la circulation alors qu'elle est fermée à d'autres périodes. Suivant les cas, il s'agit de l'ouverture de la bande d'arrêt d'urgence, d'utilisation d'une partie de la voie pour le sens entrant dans l'agglomération le matin, sortant de l'agglomération le soir, Le lecteur intéressé trouvera dans (CERTU, 2009) un ensemble d'expériences et de recommandations.

Les mises en œuvre sont différentes d'une ville à l'autre mais le principe est toujours d'affecter une voie présentant une capacité sous-utilisée à un ensemble de déplacements confrontés temporairement à une capacité insuffisante.

L'effet en termes de trafic est donc de réduire la congestion en augmentant la capacité. En termes de pollution, si la congestion est observée avec des vitesses supérieures à 30 km/h, l'effet sur les émissions à l'échappement est faible.

En termes de sécurité, diminuer la congestion ne semble pas avoir d'impact sur le nombre d'accidents, par contre cela peut avoir un effet sur la diminution de la gravité. Reste à évaluer si, lorsque la bande d'arrêt d'urgence est utilisée pour circuler, la gêne causée à la circulation des véhicules d'urgence est réelle ou non. Si cela est le cas, alors l'effet sur la sécurité tertiaire (la rapidité de prise en compte des personnes blessées dans un accident) pourrait être négatif car la gravité des accidents serait in fine, supérieure.

D. Régulation dynamique de l'interdiction de dépassement des poids lourds

Nous avons vu plus haut (page 18) que les variabilités des vitesses désirées peuvent induire des restrictions de capacité. Ceci est particulièrement vrai si la différence entre les vitesses libres des véhicules les plus rapides et les véhicules les plus lents est importante.

L'interdiction de dépassement des poids lourds vise à les maintenir sur la voie de droite d'une autoroute⁹. Cette mesure a été appliquée avec succès sur des autoroutes interurbaines avec un taux de poids lourds particulièrement important (CETE du Sud Ouest (ZELT), 2010).

Cependant sur les autoroutes périurbaines, le taux de poids lourds est élevé dans certaines agglomérations (Lyon, Paris, Bordeaux, ...), mais rarement aux heures de pointe, les conducteurs préférant ne pas traverser ces agglomérations pendant ces périodes. De plus, la différence de vitesse

.

⁹ Lors de la réunion du 3 octobre 2013, un participant a fait remarquer que les poids lourds cherchent souvent à circuler en « convois » avec des inter-distances relativement faibles car les consommations baissent du fait d'une moindre résistance de l'air à l'avancement du véhicule. Ceci réduit la consommation totale.

libre sur les autoroutes urbaines entre les véhicules légers (limités à 110 km/h et plus généralement à 90 km/h) et les véhicules lourds (limités eux, à 80 ou 90 km/h) est plus faible. Enfin, l'interdiction dynamique de dépassement poids lourds pourrait avoir pour effet de créer un « mur » de poids lourds sur la voie de droite, contraignant les véhicules qui veulent s'insérer depuis les bretelles à attendre que ce groupe de poids lourds se soit écoulé pour s'insérer, avec une vitesse nulle à leur départ de la bande d'accélération.

L'intérêt de la mise en place de l'interdiction de dépassement poids lourds sur les réseaux périurbain nous semble donc limité.

3. Actions sur la répartition modale

Une autre catégorie d'actions que peuvent mener les exploitants de réseaux autoroutiers consiste à favoriser un mode de déplacement, par exemple en lui destinant des voies réservées de l'autoroute. C'est le cas depuis plusieurs années sur l'A48 en entrée nord de Grenoble où la bande d'arrêt d'urgence a été réservée aux transports collectifs. Le nom de cette action est Voie Spécialisée Partagée (car elle est partagée entre les véhicules de TC et les véhicules d'intervention d'urgence).

Cette action agit à la fois sur :

- La demande de véhicules (on permet le même nombre de déplacements individuels mais on réduit la demande de véhicules qui souhaitent se déplacer, en favorisant le transfert du mode véhicule particulier vers le mode transports collectifs);
- L'offre puisque l'on garantit aux véhicules de transport collectif une circulation sans congestion.

A noter que la diminution de la demande de déplacements de véhicules individuels a un effet direct sur la pollution et sur l'insécurité routière puisqu'elles sont directement proportionnelles au nombre de kilomètres parcourus. D'autres déploiements sont actuellement à l'étude ou opérationnels en région parisienne notamment.

Les principaux obstacles au déploiement de ces mesures sont :

- La gestion des échangeurs, où il faut résoudre le conflit entre une circulation latérale et une circulation qui cherche à sortir de l'autoroute ;
- Le contrôle des usagers qui utilisent la voie de manière illégitime, avec des conséquences sur l'efficacité de la mesure ;
- Lors des congestions sur la section courante, il faut pouvoir maintenir une vitesse suffisante sur la bande latérale pour que la création de ces VSP procure un véritable bénéfice.

IV. Croisement des différentes régulations dynamiques des autoroutes périurbaines et des impacts sur la congestion, la pollution et l'insécurité routière

Nous dressons ci-après un tableau croisé qui constitue une première évaluation multicritère des régulations des autoroutes périurbaines. Ce tableau s'est nourri des analyses présentées précédemment. Nous n'étudions délibérément pas le cas de l'interdiction dynamique de dépassement des poids lourds qui semble n'avoir aucun bénéfice potentiel sur ce type de voirie.

Nous rappelons en revanche au début du tableau une action qui ne relève pas de la régulation dynamique : l'intervention rapide sur accident que nous avons mentionnée en introduction de la partie précédente.

Sur la pollution, nous n'analysons dans le tableau ci-après que les émissions mesurées à l'échappement. Pour qu'une action soit efficace sur les émissions à l'échappement il faut qu'elle conduise soit à une augmentation de vitesses antérieurement très faibles (inférieures à 20 km/h) soit à une diminution de vitesses antérieurement très élevées (> 100 km/h).

Si on se reporte aux valeurs données dans la Figure 6, on constate que plus le véhicule a été mis en service récemment, (et est conforme à une norme EURO de numéro plus élevé, la plus récente des normes EURO étant la norme EURO 6, qui s'applique aux poids lourds mis en services après le 1^{er} janvier 2014), moins l'effet de diminution des vitesses sur les émissions à l'échappement est important.

Sur le tableau récapitulatif de la page 39, on constate que les seules mesures qui permettent d'améliorer de manière significative simultanément les trois critères que nous avons choisis d'analyser sont celles qui favorisent le report modal :

- La tarification uniforme qui peut à terme favoriser le report modal, à condition que l'offre de transports collectifs soit attractive en comparaison du déplacement en voiture solo ;
- La création de voies spécialisées partagées ou de tout type d'augmentation de la capacité ciblée pour les transports collectifs.

A noter qu'aucune de ces deux actions n'est dynamique au sens strict.

Les actions qui conduisent à étaler la pointe dans le temps (par information avant le trajet ou par tarification dynamique) sont efficaces directement sur la congestion mais n'ont aucun effet—ni négatif, ni positif— sur les émissions et l'insécurité routière. En étalant la demande dans l'espace (c'est-à-dire en recommandant, pendant le trajet, des itinéraires alternatifs plus longs), on obtient des effets négatifs et sur la sécurité et sur les émissions alors que les effets sur le temps total passé en circulation sont bénéfiques.

Les autres mesures, conçues pour améliorer l'écoulement, sont très efficaces dans cet objectif ; mis à part la régulation des vitesses dont nous n'attendons que très peu d'effet sur la circulation à moins qu'une régulation des accès ne soit mise en place conjointement.

La régulation des accès a indéniablement des effets positifs sur la congestion et pourrait avoir des effets positifs sur la gravité des accidents, s'ils se produisent, par réduction du différentiel des vitesses. En ce qui concerne les émissions, il semble qu'il y ait un effet positif, cependant, il faudrait réaliser une analyse plus détaillée que ce que les outils actuels nous permettent. En effet, deux effets contraires se combinent sans qu'une quantification de l'un et de l'autre ne soit aisée :

 D'une part, en retardant significativement l'apparition de la période de congestion sur la section courante on peut avoir un effet positif sur les émissions, si les vitesses sont faibles en congestion; • D'autre part, si les conducteurs s'arrêtent sur la bretelle puis redémarrent pour parcourir quelques mètres, puis s'arrêtent de nouveau, on peut imaginer que les véhicules qu'ils conduisent émettront plus de polluants que si la bretelle était parcourue à une vitesse constante de l'ordre de 30 km/h.

La gestion dynamique des voies a un effet positif sur la congestion. Pour estimer si elle a un effet neutre ou négatif sur les émissions et l'insécurité routière, il est nécessaire de savoir si une demande supplémentaire est générée, à plus long terme. Si c'est le cas, les effets sur ces deux externalités seraient négatifs.

		Externalité		
		Congestion – temps perdus	Pollution (échappement seul)	Insécurité routière
laccidents		Le temps perdu est réduit d'un facteur 4 si la durée de l'accident est réduite de moitié	Pas d'effet	Pas d'effet
	Report de la demande sur un itinéraire plus long (info pendant le trajet)	Réduction des temps perdus par utilisation d'un itinéraire plus long mais plus fluide.	Augmentation des kilomètres parcourus donc effet négatif.	Augmentation des kilomètres parcourus donc effet négatif.
Actions sur la demande	report de l'heure de	Réduction des temps perdus par utilisation de l'itinéraire de plus court pendant une période fluide.	Effet positif sur les émissions à l'échappement si la vitesse en congestion est faible (inférieure à 20 km/h) hors régulation.	Pas d'effet
Actions	Favoriser le report modal par la tarification	Par la diminution de la demande, effet positif sur la congestion.	Diminution du nombre de kilomètres parcourus en voiture solo, donc effet positif.	Diminution du nombre de kilomètres parcourus en voiture solo, donc effet positif.
	tarification	Réduction des temps perdus par utilisation de l'itinéraire le plus court pendant une période fluide.	Pas d'effet	Pas d'effet
		Permet de différer l'apparition de la congestion en maintenant l'écoulement fluide plus longtemps.	congestion sont faibles	Harmonisation des vitesses entre la section courante et la bretelle, donc effet de diminution de la gravité des accidents
Actions sur l'offre	Régulation des vitesses	Pas d'effet en section courante, un effet de 2 nd ordre sur la facilité d'insertion des véhicules issus de la bretelle. Permet de maximiser l'effet de la régulation d'accès.	élevée conduit à des émissions plus importantes que celles	Harmonisation des vitesses entre la section courante et la bretelle, donc effet de diminution de la gravité des accidents
Actio	des voies périodes et qui en ont le	périodes et les mouvements qui en ont le plus besoin, donc	Effet positif si les vitesses en congestion sont faibles	Si la demande reste constante, pas d'effet
				Effet potentiel de génération d'une demande supplémentaire. Si effectif, alors effet négatif par augmentation des kilomètres parcourus
Actions simultanées sur l'offre et la demande par mise en place de voies réservées aux TC		Diminution de la demande, effet positif sur la congestion, sauf si voie réservée prise sur les voies préexistantes	Diminution du nombre de kilomètres parcourus en voiture solo, donc effet positif.	Diminution du nombre de kilomètres parcourus en voiture solo, donc effet positif.

Tableau 4 : Tableau d'analyse multicritère de l'effet des régulations dynamiques du trafic autoroutier sur la congestion, la pollution et l'insécurité routière.

V. Conclusions

Le travail présenté dans ce rapport a permis de dresser une analyse croisée des différentes régulations applicables sur les autoroutes périurbaines avec trois principales externalités : le temps total perdu, que l'on considère comme un bon indicateur de la congestion, les émissions de polluants et l'insécurité routière. Nous avons analysé différentes mesures que les exploitants peuvent appliquer ; depuis la très classique intervention la plus rapide possible pour ramener la voirie à sa capacité nominale après un accident jusqu'à des méthodes plus élaborées comme l'utilisation conjointe de la régulation dynamique des accès et des vitesses maximales autorisées.

Ce travail ouvre de nombreuses pistes de recherche futures qui méritent d'être mentionnées ici. Tout d'abord il nous semble utile de mieux comprendre les émissions liées au trafic, en analysant par exemple l'impact de la différence de définition entre la vitesse moyenne mesurée en un point par les boucles et la vitesse moyenne au cours du temps d'un véhicule qui est typiquement la grandeur utilisée pour établir les mesures d'émissions.

Ensuite, les capteurs placés sur les autoroutes urbaines (boucles électromagnétiques) sont capables de collecter des données individuelles qui, avec la massification des capacités de stockage peuvent maintenant être stockées pendant de longues périodes. Il serait intéressant de choisir un site sur lequel on dispose à la fois de capteurs de niveaux de pollution en bord d'autoroute et des données précises sur l'accidentologie pour mener conjointement, sur des périodes longues (au moins 2 ans) des collectes de données massives pour croiser la variabilité des données individuelles avec d'une part des statistiques d'accidents, d'autre part des données de pollution.

Enfin, il nous semble que du strict point de vue de la compréhension du trafic et de sa modélisation, il est utile de se pencher sur des données de trajectoires du type de celles recueillies dans le cadre de MOCoPo pour mieux comprendre les bénéfices de la régulation d'accès. En particulier éclaircir la question des causes de la chute de capacité est un objectif qui nous semble prioritaire et à portée de main, pourvu que les collectes de données permettent cette analyse.

Nous avons réalisé ce travail dans l'espoir modeste d'apporter notre pierre à généralisation de l'habitude d'évaluer les projets de régulation. Nous avons vu que les méthodes d'action sur le trafic périurbain les plus efficaces sont celles qui favorisent le report modal. Il ne faut donc plus considérer le conducteur de la voiture solo mais considérer un acteur du déplacement, un usager du réseau de transport. A noter que la distinction entre l'usager du réseau et le riverain de ce même réseau est parfois difficile à faire, mais qu'elle devrait être considérée pour analyser les impacts en termes de pollution.

De même il nous semble que l'évaluation classique des projets de régulation qui (lorsqu'elle est faite) se borne souvent à réaliser une étude des temps totaux passés avant et après la mise en place de la régulation doit maintenant être complétée par la prise en compte d'autres externalités, par exemple la pollution et l'insécurité routière.

Pour que l'évaluation multicritère soit possible il faut généraliser les collectes de données en amont (données de trafic au travers des observations individuelles par boucles électromagnétiques, données de pollution mesurées en bord de route, données d'accidentologie pendant des périodes suffisamment longues) et pendant le déploiement. De même si on agit sur le report modal, il faut prendre en compte les taux de fréquentation des transports collectifs.

C'est seulement à ce triple prix que l'on pourra justifier techniquement le déploiement plus large des régulations qui permettent de manière efficiente de limiter les impacts négatifs de la circulation automobile sur nos concitoyens, tant en ce qui concerne l'air qu'ils respirent, le temps qu'ils passent à effectuer leurs déplacements quotidiens ou le risque routier auquel ils sont exposés.

Références

Ahn, K. & Rakha, H., 2013. Network-wide Impacts of Eco-routing Strategies: A Large-scale Case Study(. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 25, pp. 119-130.

Buisson, C. & Ladier, C., 2007. A Methodology and Measure of Performance for the Evaluation of Commuters Information Systems. Washington,

Buisson, C. & Lesort, J.-B., 2010. Comprendre le trafic routier, méthodes et calculs. Lyon: CERTU.

CEREMA DTer Ile de France, 2014. *Guide à l'évaluation des temps de parcours – v1.0.* Trappes: CEREMA.

CEREMA, 2014. *Les Transports Intelligents*. [En ligne] Available at: http://www.transport-intelligent.net/ [Accès en Novembre 2014].

CERTU, 2009. La gestion dynamique des voies : état de l'art et recommandations. Lyon: CERTU.

CETE de Lyon, 2011. *Régulation des vitesses sur la N87 (rocade sud de Grenoble) - évaluation a posteriori,* Lyon: s.n.

CETE du Sud Ouest (ZELT), 2010. Régulation des vitesses et interdiction de dépasser pour les poids lourds sur le réseau d'ASF - rapport d'évaluation 2010, Toulouse: s.n.

Duret, A., 2010. Variabilité des vehicules identification, quantification, impact global sur le trafic. Mémoire de doctorat. Lyon: ENTPE.

Duret, A., 2014. Théorie du trafic et régulation dynamique.

Golob, T. F. & Recker, W. W., 2004. A method for relating type of crash to traffic flow characteristics on urban freeways. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(1), pp. 53-80.

Hamdar, S. H., Treiber, M. & Mahmassani, H. S., 2009. From Human Perception to Traffic Collisions: Modeling Driver Behavior in a Risk-Taking Environment. Shanghai, s.n.

Knoop, V., 2010. Dynamic speed limits. Lyon: CERTU.

Marczak, F., 2014. Observation empirique et modélisation des discontinuïtés du réseau autoroutier : vers l'estimation d'une capacité. Mémoire de doctorat. Lyon: ENTPE.

Martin, J.-L., 2002. Relationship between crash rate and hourly traffic flow on interurban motorways. *Accident Analysis And Prevention*, 34(5), pp. 619-629.

Martin, J.-L., 2014. Communication privée [Interview] (Septembre 2014).

ONISR, 2000. Bilan 2000 de la sécurité routière en France, s.l.: s.n.

ONISR, 2014. http://www.securite-routiere.gouv.fr/la-securite-routiere/l-observatoire-national-interministeriel-de-la-securite-routiere/bilans-annuels/les-bilans-annuels-de-la-securite-routiere-enfrance, Paris: s.n.

ONISR, 2014. Relation entre la vitesse pratiquée et les accidents : Les modèles de Nilsson et Elvik. [En ligne] Available at: http://www.securite-routiere.gouv.fr/la-securite-routiere/l-observatoire-national-interministeriel-de-la-securite-routiere?id rubrique=8 [Accès en novembre 2014].

Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H. & Blosseville, J.-M., 1991. ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering. *Transportation Research Record*, Volume 1320, pp. 58-64.

Ragione, L., Meccariello, G., Punzo, V. & a. C. B., 2009. A preliminary study to evaluate emissions factors by real and micro simulated driving cycle. s.l., s.n.

Veira da Rocha, T., 2013. *Quantification des erreurs associées à l'usage de trajectoires simplifiées, issues de modèles de trafic, pour le calcul de la consommation en carburant,* Lyon: ENTPE.

Viallon, V. & Laumon, B., 2013. Fraction of fatal crashes attributable to speeding: Evolution for the period 2001-2010 in France. *Accident Analysis and Prevention*, Volume 52, pp. 250-256.





Photos prises lors de la réunion de février 2013 de la collaboration MOCoPo