



HAL
open science

Analyse et modélisation de l'impact de la météorologie sur le trafic routier

Romain Billot

► **To cite this version:**

Romain Billot. Analyse et modélisation de l'impact de la météorologie sur le trafic routier. Autre. Ecole Centrale Paris, 2010. Français. NNT : 2010ECAP0037 . tel-00557812

HAL Id: tel-00557812

<https://theses.hal.science/tel-00557812>

Submitted on 20 Jan 2011

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

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



Institut national de recherche
sur les transports et leur sécurité



Analyse et modélisation de l'impact de la météorologie sur le trafic routier

ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES
« ÉCOLE CENTRALE PARIS »

THÈSE

Pour l'obtention du
GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : Mathématiques appliquées
Laboratoire d'accueil : Mathématiques Appliquées aux Systèmes

Par :
Romain BILLOT

Rapport LICIT N° 1005
Octobre 2010

Directeurs de thèse :
Dr. Florian De Vuyst,
Professeur à l' Ecole Centrale Paris
Dr. Nour-Eddin El Faouzi,
Directeur de Recherches INRETS
Directeur du LICIT



**ÉCOLE CENTRALE DES ARTS
ET MANUFACTURES
« ÉCOLE CENTRALE PARIS »**

THÈSE
présentée par

Romain BILLOT

pour l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : mathématiques appliquées.

Laboratoire d'accueil : Mathématiques Appliquées aux Systèmes (MAS)

SUJET :

Analyse et modélisation de l'impact de la météorologie sur le trafic routier

soutenue le : 08 décembre 2010

devant un jury composé de :

**Jacques Sau (Pr. Émérite, université de Lyon I)
Nour-Eddin El Faouzi (directeur de recherche, INRETS)
Gilles Fleury (Pr., SUPELEC)
Hani Mahmassani (Pr, université de Northwestern)
Michel Rasle (Pr. Émérite, université de Nice)
Florian de Vuyst (Pr., Ecole Centrale Paris)**

**Président
Directeur de thèse
Examineur
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse**

Numéro d'ordre 2010ECAP0037

Fiche bibliographique

1- UR (1er auteur) Laboratoire d'ingénierie Circulation Transports	2- Projet n° Thèse	3- INRETS LICIT n° 1005	
4- Titre Analyse et modélisation de l'impact de la météorologie sur le trafic routier			
5- Sous-titre		6- Langue Français	
7- Auteur(s) Romain BILLOT		8- Rattachement ext.	
9- Nom adresse financeur, co-éditeur		10- N° contrat, conv.	
		11- Date de publication Octobre 2010	
12- Remarques			
<p>13- Résumé</p> <p>Si la pertinence de la prise en compte de la météorologie dans la gestion du trafic est bien admise, son intégration dans les outils d'aide à la décision et les stratégies de contrôle représente encore un enjeu réel pour les gestionnaires d'infrastructures. En effet, cette avancée semble légitimée par les effets significatifs d'une météorologie dégradée sur la sécurité des usagers et le comportement des conducteurs. Ainsi, au niveau de la sécurité, un sur-risque d'accident a été mis en évidence par de nombreux travaux. Or, l'étiologie de ce risque augmenté ne permet pas seulement de démontrer l'impact d'événements météorologiques extrêmes et ponctuels (ex : tempêtes de neige), mais également celui de phénomènes récurrents (ex : la pluie). La baisse de la sécurité des conducteurs se traduit concrètement par un changement de comportements des usagers (vitesses, temps inter-véhiculaires) mais aussi du flot de véhicules en général (vitesse, débit, concentration), ceci influant de manière conséquente sur la mobilité. De fait, la pluie représente ainsi la seconde cause de congestion ponctuelle.</p> <p>Pourtant, malgré ces enjeux indéniables, les effets de la météorologie sur le trafic demeurent mal quantifiés et ne sont guère intégrés à la modélisation ou l'estimation du trafic. Ce travail de thèse se propose ainsi de contribuer à une meilleure compréhension des effets météorologiques sur le trafic, en se focalisant sur des phénomènes de précipitations en milieu interurbain. Partant d'un état de l'art de l'impact météorologique sur le trafic, il nous est apparu que les études existantes, par leurs carences, soulèvent le besoin de fonder une méthodologie d'analyse plus rigoureuse. Cette méthodologie, une fois clairement définie, a ensuite été appliquée à des données opérationnelles. Elle nous a permis de quantifier les effets de la pluie à plusieurs niveaux selon l'échelle de représentation abordée : au niveau microscopique, considérant le comportement individuel des conducteurs, les analyses statistiques mettent en lumière des effets sur les vitesses, les temps et les distances inter-véhiculaires. Ces effets se reflètent au niveau macroscopique (celui du flot de véhicules) avec des variations de débits, de vitesses du flot et, de façon générale, de l'ensemble des paramètres formant le diagramme fondamental du trafic. Les résultats empiriques nous semblent ainsi ouvrir la voie à l'intégration du phénomène météorologique à la modélisation du trafic.</p> <p>Partant, nous avons développé, à ce stade de notre travail, une contribution théorique à la modélisation du trafic se fondant sur une formulation Vlasov qui permet de dériver un modèle macroscopique à deux équations à partir d'une formulation cinétique. Le modèle ainsi proposé offre un cadre propice à l'intégration d'un paramètre météorologique. La discrétisation numérique du modèle s'effectue à l'aide d'une méthode à pas fractionnaire qui permet de traiter successivement le terme source et la partie homogène du système. Pour la partie homogène du système, nous avons fait l'usage d'un schéma de type Lagrange-remap. Le comportement du modèle, couplé à une équation de transport sur les temps inter-véhiculaires, a ensuite été illustré à travers une série d'expérimentations numériques qui ont mis en évidence ses aptitudes face à des conditions météorologiques changeantes.</p> <p>Dans un ultime volet, notre travail s'est orienté vers de futures applications en temps réel qui se placeraient dans un cadre bayésien d'assimilation de données. Le défi à relever est celui de l'estimation en ligne du vecteur d'état du trafic au fur et à mesure de l'arrivée de nouvelles observations. Une méthode de filtrage particulière (Monte Carlo séquentielle) nous a paru judicieuse à mobiliser, car elle s'adapte bien à la problématique du trafic routier. Plusieurs scénarios fondés sur des données opérationnelles permettent ensuite de montrer les bénéfices de l'intégration du phénomène météorologique à de telles approches. Une meilleure connaissance du phénomène météorologique doit ainsi mener à son insertion dans les modèles de trafic qui forment le substrat des outils d'aide à la décision destinés aux gestionnaires. Le travail proposé ouvre donc des perspectives pour le développement de stratégies de gestion de trafic météo-sensibles.</p>			
14- Mots clés Modélisation du trafic, météorologie, analyse de données, modèles du deuxième ordre, schémas numériques, estimation, méthode de Monte-Carlo séquentielle, filtrage particulière,		15- Diffusion INRETS/RR/10-572-FR	
16- Nb de pages 174	17- Prix	18- Bibliographie oui	19- Confidentiel

Publication data form

1- UR (1st author) Transport and Traffic engineering Laboratory - LICIT	2- Projet n° Thesis	3- INRETS LICIT N° 1005	
4- Title Analysis and modeling of the weather impact on traffic			
5- Subtitle		6- Language French	
7- Author(s) Romain BILLOT		8- Affiliation	
9- Sponsor, co-editor, name and address		10- Contract, conv. N°	
		11- Publication date October 2010	
12- Notes			
<p>13- Summary</p> <p>The integration of the weather effects into decision support tools and real time traffic management strategies represents a critical need for all road operators. The motivations are clear because of the significant effects of adverse weather on road safety and drivers' behaviors. At a safety level, the increase of the crash frequency and severity has been highlighted by several studies. This increase of the crash risk does not concern only extreme weather events, such as winter storms, but also recurring events like rain. The changes in drivers' behaviors (decrease of speeds, headways) and traffic flow dynamics (speed, flow, density) lead to significant consequences from a mobility point of view : thus, rain represents the second largest cause of non recurring congestion (15 %) after incidents.</p> <p>In spite of this context, the effects of adverse weather on traffic are not well quantified and, above all, not integrated into traffic modelling and estimation. The presented thesis research aims at contributing to a better understanding of the meteorological effects on traffic by focusing on precipitation events at interurban sections. From a literature review of the meteorological impact on traffic, we have underlined a need of a standardized methodology. Such a standardized methodology for the rain impact quantification is proposed and applied to real data. It enables a quantification of the rain effects at different levels, according to the scale of representation : at a microscopic level, the statistical analyses highlight changes in drivers speeds, time headways. Those effects reflect on the macroscopic level of traffic flow with changes in speed, flows, and, in a general way, in all the parameters composing the fundamental diagram of traffic. Hence, the empirical results pave the way for integrating the meteorological phenomenon into traffic modelling.</p> <p>Next, we propose a theoretical contribution to traffic modelling, based on a Vlasov formulation, which enables the derivation of a two equations macroscopic model. The proposed model offers a relevant framework for the integration of a meteorological parameter. Regarding the numerical discretization, we propose a fractionnal step method allowing to deal successively with the source terme and the homogeneous part of the system. We develop a Lagrange+remap scheme for the homogeneous part of the system. The model behaviour is illustrated through several numerical experiments which highlight the model features faced with changing meteorological conditions.</p> <p>In the last chapter, an effort towards future online applications is put forward. Within a Bayesian framework for data assimilation, the goal resides in the online estimation of the traffic state vector given current measurements. Based on real world data, some scenarios show the benefits of the integration of the meteorology into such approaches. Thus, a better knowledge of the weather impact on traffic leads to its integration into traffic models and will enable the improvement of decision support tools for road operators. The proposed work opens perspectives for the development of weather-responsive traffic management strategies.</p>			
14- Key Words Traffic modelling, météorology, data mining, second order traffic models, numerical schemes, estimation, particle filtering.		15- Distribution statement INRETS/RR/10-572-FR	
16- Nb of pages 174	17- Price	18- Bibliography Yes	19- Confidential

À Marion

Remerciements

J'aimerais remercier ici quelques personnes qui m'ont accompagné sur les chemins retors de ce long marathon. Comment ne pas commencer par mes deux directeurs de thèse, Nour-Eddin et Florian, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces trois années. Je mesure bien ma chance d'avoir pu être encadré par deux personnes exceptionnelles sur les plans humain et professionnel.

Le travail présenté n'aurait pas eu la même richesse sans ma rencontre avec le professeur (émérite !) Jacques Sau, qui a partagé avec moi, et en toute simplicité, son immense savoir sur le filtrage bayésien et la modélisation du trafic en général. Les quelques heures de discussion passées en sa compagnie auront été des plus formatrices et agréables. C'est un honneur d'avoir pu le compter dans mon jury de thèse, au même titre que MM. Fleury, Mahmassani et Rascle, que je tiens à remercier pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Mon aspiration à des activités de recherche découle de ma rencontre avec Stéphane Lallich à l'université Lyon 2, qui a encadré mon stage de Master. Sa finesse, sa curiosité, sa lucidité et son enthousiasme m'auront poussé tout naturellement à franchir le Rubicon, pour un choix que je n'aurai jamais à regretter.

Ces années à l'INRETS auront été émaillées de plusieurs voyages marquants au gré de différentes conférences. Cette possibilité offerte aux doctorants de présenter directement leurs travaux à travers le monde s'avère de plus en plus rare dans le monde universaire. Aussi, je tiens à remercier M. Rémy Fondacci, directeur du LICIT pendant la quasi-totalité de la thèse, de la place et de l'intérêt qu'il accordait aux doctorants de son laboratoire, avec un soutien administratif toujours bien venu. Ce soutien est venu également des différentes personnes aptes à me guider dans les arcanes de l'INRETS ou de l'école centrale. Coté INRETS, Marie-Thérèse, Sonia, Chantal et bien sûr Sylvie auront toujours été là au bon moment tandis que Catherine et Géraldine de l'École Centrale auront été précieuses de par leur aide et leur compréhension vis-à-vis de la distance et de la co-direction INRETS/ECP.

Je finirai par remercier, sans les citer, tous mes collègues de l'INRETS, de l'ECP, et de Lyon 2, ainsi que ma famille et mes amis, pour leur présence sans faille.

Enfin, là encore, je ne saurais oublier Marion.

Résumé

Si la pertinence de la prise en compte de la météorologie dans la gestion du trafic est bien admise, son intégration dans les outils d'aide à la décision et les stratégies de contrôle représente encore un enjeu réel pour les gestionnaires d'infrastructures. En effet, cette avancée semble légitimée par les effets significatifs d'une météorologie dégradée sur la sécurité des usagers et le comportement des conducteurs. Ainsi, au niveau de la sécurité, un sur-risque d'accident a été mis en évidence par de nombreux travaux. Or, l'étiologie de ce risque augmenté ne permet pas seulement de démontrer l'impact d'évènements météorologiques extrêmes et ponctuels (ex : tempêtes de neige), mais également celui de phénomènes récurrents (ex : la pluie). La baisse de la sécurité des conducteurs se traduit concrètement par un changement de comportements des usagers (vitesses, temps inter-véhiculaires) mais aussi du flot de véhicules en général (vitesse, débit, concentration), ceci influant de manière conséquente sur la mobilité. De fait, la pluie représente ainsi la seconde cause de congestion ponctuelle.

Pourtant, malgré ces enjeux indéniables, les effets de la météorologie sur le trafic demeurent mal quantifiés et ne sont guère intégrés à la modélisation ou l'estimation du trafic. Ce travail de thèse se propose ainsi de contribuer à une meilleure compréhension des effets météorologiques sur le trafic, en se focalisant sur des phénomènes de précipitations en milieu interurbain. Partant d'un état de l'art de l'impact météorologique sur le trafic, il nous est apparu que les études existantes, par leurs carences, soulèvent le besoin de fonder une méthodologie d'analyse plus rigoureuse. Cette méthodologie, une fois clairement définie, a ensuite été appliquée à des données opérationnelles. Elle nous a permis de quantifier les effets de la pluie à plusieurs niveaux selon l'échelle de représentation abordée : au niveau microscopique, considérant le comportement individuel des conducteurs, les analyses statistiques mettent en lumière des effets sur les vitesses, les temps et les distances inter-véhiculaires. Ces effets se reflètent au niveau macroscopique (celui du flot de véhicules) avec des variations de débits, de vitesses du flot et, de façon générale, de l'ensemble des paramètres formant le diagramme fondamental du trafic. Les résultats empiriques nous semblent ainsi ouvrir la voie à l'intégration du phénomène météorologique à la modélisation du trafic.

Partant, nous avons développé, à ce stade de notre travail, une contribution théorique à la modélisation du trafic se fondant sur une formulation Vlasov qui permet de dériver un modèle macroscopique à deux équations à partir d'une formulation cinétique. Le modèle ainsi proposé offre un cadre propice à l'intégration d'un paramètre météorologique. La discrétisation numérique du modèle s'effectue à l'aide d'une méthode à pas fractionnaire qui permet de traiter successivement le terme source et

la partie homogène du système. Pour la partie homogène du système, nous avons fait l'usage d'un schéma de type Lagrange+remap. Le comportement du modèle, couplé à une équation de transport sur les temps inter-véhiculaires, a ensuite été illustré à travers une série d'expérimentations numériques qui ont mis en évidence ses aptitudes face à des conditions météorologiques changeantes.

Dans un ultime volet, notre travail s'est orienté vers de futures applications en temps réel qui se placeraient dans un cadre bayésien d'assimilation de données. Le défi à relever est celui de l'estimation en ligne du vecteur d'état du trafic au fur et à mesure de l'arrivée de nouvelles observations. Une méthode de filtrage particulière (Monte Carlo séquentielle) nous a paru judicieuse à mobiliser, car elle s'adapte bien à la problématique du trafic routier. Plusieurs scénarios fondés sur des données opérationnelles permettent ensuite de montrer les bénéfices de l'intégration du phénomène météorologique à de telles approches. Une meilleure connaissance du phénomène météorologique doit ainsi mener à son insertion dans les modèles de trafic qui forment le substrat des outils d'aide à la décision destinés aux gestionnaires. Le travail proposé ouvre donc des perspectives pour le développement de stratégies de gestion de trafic météo-sensibles.

Abstract

The integration of the weather effects into decision support tools and real time traffic management strategies represents a critical need for all road operators. The motivations are clear because of the significant effects of adverse weather on road safety and drivers' behaviors. At a safety level, the increase of the crash frequency and severity has been highlighted by several studies. This increase of the crash risk does not concern only extreme weather events, such as winter storms, but also recurring events like rain. The changes in drivers' behaviors (decrease of speeds, headways) and traffic flow dynamics (speed, flow, density) lead to significant consequences from a mobility point of view : thus, rain represents the second largest cause of non recurring congestion (15 %) after incidents.

In spite of this context, the effects of adverse weather on traffic are not well quantified and, above all, not integrated into traffic modelling and estimation. The presented thesis research aims at contributing to a better understanding of the meteorological effects on traffic by focusing on precipitation events at interurban sections. From a literature review of the meteorological impact on traffic, we have underlined a need of a standardized methodology. Such a standardized methodology for the rain impact quantification is proposed and applied to real data. It enables a quantification of the rain effects at different levels, according to the scale of representation : at a microscopic level, the statistical analyses highlight changes in drivers speeds, time headways. Those effects reflect on the macroscopic level of traffic flow with changes in speed, flows, and, in a general way, in all the parameters composing the fundamental diagram of traffic. Hence, the empirical results pave the way for integrating the meteorological phenomenon into traffic modelling.

Next, we propose a theoretical contribution to traffic modelling, based on a Vlasov formulation, which enables the derivation of a two equations macroscopic model. The proposed model offers a relevant framework for the integration of a meteorological parameter. Regarding the numerical discretization, we propose a fractionnal step method allowing to deal successively with the source terme and the homogeneous part of the system. We develop a Lagrange+remap scheme for the homogeneous part of the system. The model behaviour is illustrated through several numerical experiments which highlight the model features faced with changing meteorological conditions.

In the last chapter, an effort towards future online applications is put forward. Within a Bayesian framework for data assimilation, the goal resides in the online estimation of the traffic state vector given current measurements. Based on real world data, some scenarios show the benefits of the integration of the meteorology into such approaches. Thus, a better knowledge of the weather impact on traffic leads to its

integration into traffic models and will enable the improvement of decision support tools for road operators. The proposed work opens perspectives for the development of weather-responsive traffic management strategies.

Liste des publications

Publications dans des revues à comité de lecture :

BILLOT, R., CHALONS, C., DE VUYST, F., EL FAOUZI, N.-E., SAU, J., A conditionally linearly stable second order traffic model derived from a Vlasov kinetic description. *Compte-Rendu de l'Académie des Sciences*, section Mécanique, 2010.

BILLOT, R., EL FAOUZI, N.-E., DE VUYST, F., A Multilevel Assessment of Rain Impact on Drivers' Behaviors : Standardized Methodology and Empirical Analysis. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* 2107, ISSN 0361-1981, pp. 134-142, 2009.

BILLOT, R., EL FAOUZI, N.-E., SAU, J., DE VUYST, F., Integrating the Impact of Rain into Traffic Management : Online Traffic State Estimation Using Sequential Monte Carlo Techniques, *Transportation Research Records : Journal of the Transportation Research Board*, 2010.

EL FAOUZI, N.-E., DE MOUZON, O., BILLOT, R., SAU, J., Assessing individual driver behaviour and macroscopic traffic changes due to the weather conditions, *Advances in Transportation Studies - An International Journal* 21(A), pp. 33-46, 2010.

EL FAOUZI, N.-E., BILLOT, R. , BOUZEBDA, S., Motorway travel time prediction based on toll data and weather effect integration, *IET Intelligent Transport Systems*, 2010.

Publications dans des actes de conférences internationales à comité de sélection et/ou lecture :

BILLOT, R., DE VUYST, F., EL FAOUZI, N.-E., How does the fundamental diagram affect traffic characterization in a kinetic modeling? Some evidence and weather effects integration. *Summer Meeting of the TRB Traffic Flow Theory Committee*, 2010.

BILLOT, R., EL FAOUZI, N.-E., SAU, J., DE VUYST, F., Integrating the Impact of Rain into Traffic Management : Online Traffic State Estimation Using Sequential Monte Carlo Techniques, *Proceedings of the 89th Transportation Research Board*

Annual Meeting (TRB), Washington (USA), 10-16 January, 2010.

BILLOT R., N.-E. EL FAOUZI N.-E., DE VUYST, F., A Multilevel Assessment of Rain Impact on Drivers' Behaviors : Standardized Methodology and Empirical Analysis. *Proceedings of the 88th Transportation Research Board Annual Meeting (TRB)*, Washington (USA), 11-15 January, 2009.

BILLOT, R., EL FAOUZI, N.-E., SAU, J. AND DE VUYST, F., How does Rain affect traffic indicators? Empirical study on a French interurban motorway, *Proceedings of the Lakeside Conference*, Klagenfurt (Austria), 2008.

BILLOT, R., Integrating the effects of adverse weather on traffic : methodology, empirical analyses and simulation. *Young researcher seminar 2009*, Torino (Italie), 5-9 June 2009.

BILLOT R., SUCHIER H.-M., LALLICH S., Toward an Unsupervised Boosting-Like Approach, *Proceedings of the first joint meeting of the Société Francophone de Classification and the Classification and Data Analysis Group of the Italian Society of Statistics*, SFC CLADAG 2008, Caserta (Italie), 2008.

BOUSQUET, A., SAU, J., EL FAOUZI, N.-E., BILLOT, R., Frequency-based characteristics of urban traffic and space-state modelling for travel time estimation, *5th IMA Conference on Mathematics in Transport*, London (U.K.), 12-14 April, 2010.

EL FAOUZI, N.-E., BILLOT, R. , BOUZEBDA, S., Spatio-temporal search algorithm and weather impact integration for travel time prediction based on motorway toll data. *16th ITS world congress*, Stockholm (Suède), 21-25 September, 2009.

EL FAOUZI N.-E., O. DE MOUZON AND BILLOT, R., Toward Weather-Responsive Traffic Management on French Motorways, *proceedings of the fourth national conference on surface transportation weather*, *Transportation Research E-Circular Issue Number : E-C126*, Indianapolis (USA), pp. 443-456, 2008.

EL FAOUZI, N.-E., BILLOT, R., NURMI, P., NOWOTNY, B., Effects of adverse weather on traffic and safety : State of the art and the European initiative, *15th SIRWEC conference* Quebec City (Quebec), 2010.

Publications dans des actes de conférences nationales à comité de sélection et/ou lecture :

BILLOT R., SUCHIER H.M., LALLICH S., Une approche ensembliste inspirée du boosting en classification non supervisée, *Actes 8e Conférence Extraction et Gestion des Connaissances, EGC 2008*, Nice (France), *Revue des Nouvelles Technologies de l'Information*, RNTI, 2008.

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	v
Abstract	vii
Liste des publications	ix
Table des matières	xi
Introduction générale	1
La gestion du trafic routier en 2010 : enjeux et défis	1
La météorologie : une source d'incertitude mal maîtrisée	3
Contributions et plan de la thèse	4
1 Etat de l'art des effets des conditions météorologiques sur le trafic	9
1.1 Introduction	10
1.2 Caractérisation du trafic routier	10
1.2.1 Variables macroscopiques du trafic	10
1.2.2 Données trafic et leurs principales sources	14
1.2.3 Données météorologiques et leurs principales sources	16
1.3 Impact de la météorologie sur la demande	18
1.3.1 Effets sur les choix de déplacement et le report modal	18
1.3.2 Effets sur les volumes de trafic	20
1.3.3 Conclusion	23
1.4 Impact météorologique sur le comportement des conducteurs	23
1.5 Impact météorologique sur la qualité de l'écoulement	25
1.5.1 Effets sur la vitesse	25
1.5.2 Effets sur la capacité	27
1.5.3 Effets sur le diagramme fondamental	28
1.5.4 Effets sur les temps de parcours	30
1.6 Conclusion	31
2 Méthodologie d'analyse et quantification des effets météorologiques sur le trafic	33
2.1 Introduction	34
2.2 Etudes préliminaires	34

2.2.1	Etude 1 : analyse de données individuelles. Cas des données ASF	35
2.2.2	Etude 2 : analyse de données agrégées. Cas des données APRR	38
2.2.3	Conclusions	40
2.3	Démarche méthodologique	41
2.3.1	Problématique	41
2.3.2	Méthodologie multi-niveaux	42
2.3.3	Entreposage des données et solutions logicielles	46
2.4	Application à des données opérationnelles	47
2.4.1	Description des données	47
2.4.2	Prétraitement et échantillonnage	50
2.4.3	Niveau microscopique	52
2.4.4	Niveau mésoscopique : analyse des pelotons	59
2.4.5	Niveau macroscopique	62
2.5	Conclusions	64
3	Modélisation du trafic et intégration des effets météorologiques	67
3.1	Introduction	68
3.2	Etat de l'art des modèles de trafic	69
3.2.1	Modélisation microscopique	69
3.2.2	Modélisation macroscopique	70
3.2.3	Modélisation mésoscopique ou cinétique	77
3.2.4	Conclusion et contexte du travail de recherche présenté	79
3.3	Contribution à la modélisation du 2ème ordre	81
3.3.1	Formulation générale Vlasov	81
3.3.2	Fermetures des termes d'accélération et de relaxation	83
3.3.3	Dérivation des équations macroscopiques	85
3.3.4	Propriétés du système et analyse de stabilité linéaire	86
3.3.5	Vers un modèle hybride : équation de transport sur les distributions de temps inter-véhiculaires	90
3.3.6	Synthèse	90
3.4	Intégration des effets météorologiques dans les modèles	91
3.4.1	Modèles du premier ordre	91
3.4.2	Modèle du deuxième ordre et système hybride	94
3.5	Conclusion	95
4	Discrétisation numérique et expérimentations	97
4.1	Introduction	98
4.2	Discrétisation numérique	98
4.2.1	Discrétisation temporelle : méthode à pas fractionnaire	98
4.2.2	Discrétisation spatiale : schéma Lagrange-projection	102
4.2.3	Traitement des conditions aux limites	105
4.3	Expérimentations	107
4.3.1	Données initiales en créneau	107
4.3.2	Mise en évidence des instabilités linéaires et non linéaires du modèle	108

4.3.3	Comportement du modèle face aux changements météorologiques	111
4.4	Bilan des expériences numériques	122
5	Vers des applications en ligne : méthode d'estimation du vecteur d'état pour le trafic routier.	125
5.1	Introduction	126
5.2	Filtrage bayésien : principe et méthodes	127
5.2.1	Formulation du filtre non linéaire optimal	127
5.2.2	Filtre de Kalman et extensions au cas non linéaire	128
5.2.3	Filtrage particulière	131
5.3	Estimation bayésienne et trafic routier	136
5.4	Méthode de Monte Carlo Séquentielle pour le trafic routier avec intégration de la météorologie	137
5.4.1	Modèle macroscopique du 1er ordre	138
5.4.2	Méthode de Monte Carlo Séquentielle (MCS)	139
5.4.3	Présentation des données du périphérique lyonnais	141
5.4.4	Paramètres du modèle et procédure de détection des erreurs d'estimation	142
5.4.5	Résultats avec intégration des effets de la pluie	144
5.5	Conclusion	151
	Conclusion	153
	Bibliographie	159
	Liste des figures	171

Introduction générale

Au début, la jeune fille de la Dauphine aurait bien voulu compter les heures, mais l'ingénieur de la 404 n'en voyait pas l'intérêt. Tout le monde pouvait regarder sa montre mais c'est comme si ce temps attaché au poignet ou le bip bip de la radio mesurait autre chose, par exemple le temps de ceux qui n'avaient pas fait la bêtise de rentrer à Paris par l'autoroute du sud un dimanche après-midi et qui n'avaient pas dû, dès après Fontainebleau, se mettre au pas, s'arrêter, six files de chaque côté (on sait que les dimanches l'autoroute est réservée exclusivement à ceux qui rentrent à Paris), remettre le moteur en marche, avancer de trois mètres, s'arrêter.

Julio Cortàzar. *L'autoroute du sud*

La gestion du trafic routier en 2010 : enjeux et défis

Une cohorte interminable de véhicules à l'arrêt, et leurs occupants, prisonniers d'un bouchon monstrueux, s'étalant à perte de vue sans quelque espoir de résorption : tel est le décor planté par Julio Cortàzar dans une nouvelle qui inspira en 1979 le long métrage de Luigi Comencini, intitulé *le grand embouteillage*. Il semble que cette fiction ait pris une forme bien réelle en cet été 2010 et il n'est guère étonnant que la Chine en soit le théâtre. Pendant près de deux semaines, le "plus grand embouteillage du monde" s'est maintenu inexorablement sur la section G110 ralliant Pékin à Zhangjiakou, paralysant le trafic sur plus d'une centaine de kilomètres, malgré l'ensemble de mesures d'urgence prises par les autorités. A l'origine de cette hyper-saturation se trouve un évènement ponctuel (travaux de maintenance) mais aussi et surtout une augmentation incontrôlée de 40 % par an du volume de trafic sur cette autoroute. Or, si certains journaux se sont interrogés sur la possibilité d'un canular, les spécialistes de la gestion de trafic en Europe ne seraient pas surpris outre mesure que les problèmes de congestion, transposés à l'échelle d'une Chine devenue le symbole d'un développement économique et industriel sans précédent, s'en trouvent démultipliés.

L'exemple de la Chine est symptomatique d'une inadéquation entre les infrastructures de transport (l'offre) et la croissance soutenue du parc automobile et du trafic routier (la demande). Si les années 2000 ont été témoins avec Internet d'une troisième révolution industrielle, qui, dans un contexte de mondialisation toujours plus important, a profondément bouleversé nos sociétés, le trafic routier n'a pas

pour autant été virtualisé et le besoin en transport des biens et personnes poursuit sa croissance. A l'inverse des courriers, flux financiers ou autres informations qui circulent par millions chaque jour à travers autant de transactions électroniques quasi instantanées, le trafic routier reste lui dépendant de contraintes physiques, nécessitant une gestion de l'espace expédiente. C'est ainsi que l'on a vu naître, depuis un certain temps déjà, un besoin d'optimiser l'usage des infrastructures de transport afin de réduire les phénomènes typiques de congestion. Aujourd'hui, des préoccupations économiques et plus récemment environnementales contraignent les exploitants à gérer les infrastructures existantes plutôt que de poursuivre leur extension. Dans ce contexte, les systèmes de transport intelligents (*Intelligent Transport Systems*) ont été introduits pendant la dernière décennie comme un ensemble de méthodes et d'équipements visant à optimiser l'usage des infrastructures par des solutions technologiques, mais aussi par une meilleure information des usagers, ceci dans le but d'accroître leur confort et leur sécurité. La prévision en temps réel des temps de parcours, la diffusion de l'information trafic sur différents supports (ex : panneaux à messages variables), la régulation des vitesses, le contrôle d'accès ou la gestion dynamique des voies de circulation sont autant de stratégies utilisées. Quant aux systèmes coopératifs (considérés comme les systèmes ITS de deuxième génération), qui se fondent sur des moyens de communication entre les véhicules ou avec l'infrastructure, pour optimiser les performances sur le réseau, ils sont en plein essor.

Au sein des processus de conception touchant à l'ensemble des outils d'aide à la décision destinés aux gestionnaires d'infrastructures routières, la modélisation du trafic constitue la pierre angulaire. Depuis 1955 et les travaux pionniers de Lighthill, Whitham et Richards [97], les scientifiques du domaine ont entrepris un intense travail de recherche pluridisciplinaire visant à mieux appréhender la dynamique du trafic et, ainsi, à mieux le comprendre et le prévoir. Les développements de modèles mathématiques et physiques ne se sont pas pour autant déconnectés des problématiques sous-jacentes liées au monde réel. Après quelques décennies de développement de modèles déterministes, on a vu émerger de nouvelles préoccupations liées à des applications concrètes de ces modèles à la gestion du trafic. De ce fait, leur amélioration passe aujourd'hui par une prise en compte des incertitudes et des sources d'hétérogénéité qui s'intégreraient avantageusement dans des outils de gestion temps-réel du trafic. On dénote ainsi des thématiques multi-classes et multi-voies, qui participent d'un raffinement des descriptions existantes. Dans cette optique, les variations des conditions météorologiques représentent également une source d'incertitude pouvant affecter les comportements des conducteurs, du flot de véhicules en général, et par voie de conséquence, les paramètres des modèles de trafic en particulier. Quoique très intuitif pour le conducteur λ , ce phénomène a été très peu étudié en France et en Europe en dépit des enjeux réels qu'il sous-tend en termes de sécurité ou de mobilité.

La météorologie : une source d'incertitude mal maîtrisée

Une météorologie inclemente (neige, pluie, brouillard, vent ou autres conditions) peut être lourde de conséquences sur un réseau routier, aussi bien du point de vue de la sécurité que de la fluidité du réseau. Chacun se souvient par exemple du terrible hiver 2005-2006 pendant lequel d'importantes chutes de neige et du brouillard entraînent un blocage nocturne de plusieurs dizaines d'usagers sur l'autoroute A84 entre Caen et Rennes. L'importance d'évènements extrêmes comme la neige et les tempêtes de neige n'est pas négligée et a donné lieu à de nombreuses études ainsi qu'au développement de systèmes de gestion et de maintenance hivernale. Cependant, les stratégies actuelles de gestion de trafic utilisent des outils peu voire non sensibles aux conditions météorologiques, faisant naître un réel besoin de la part des gestionnaires d'infrastructures. Hormis le type d'évènement extrême et ponctuel sus-cité, nul ne peut ignorer l'importance que peuvent revêtir des phénomènes moins intenses mais plus fréquents comme les précipitations d'intensité légère à moyenne. Ainsi, selon l'administration fédérale américaine des autoroutes (FHWA [49]), la pluie constitue la deuxième grande cause de congestion non récurrente. 15 % des congestions non récurrentes sont dues à des conditions météorologiques particulières et la pluie peut augmenter les temps de parcours de 12 à 20 %. Mais la principale source de motivation des travaux sur ce thème réside dans l'influence de la météorologie sur la sécurité routière. Même si les avancées technologiques comme le freinage ABS (*Anti Blocking System*), les quatre roues motrices, la correction de trajectoire (ESP) etc., participent d'une sécurité accrue, il y a une relation claire entre conditions météorologiques dégradées et sécurité routière qu'un certain nombre d'études ont mis en exergue. Selon une étude de la FHWA fondée sur les statistiques de l'administration américaine de la sécurité routière (NHTSA), 24 % des 6 400 000 accidents annuels (en moyenne) se produisent lors de conditions dégradées : pluie, neige, brouillard, chaussée mouillée ou glissante. A ces chiffres s'ajoutent ceux relatifs aux dommages corporels : 673 000 personnes blessées et 7400 tuées [49]. En scrutant en détail la nature des conditions météorologiques propres à ces accidents, il apparaît que 47 % ont eu lieu lors de conditions pluvieuses, qui sont, bien entendu, associées à une chaussée humide. Toujours aux Etats-Unis, Lin et Nixon [98] ont effectué une synthèse bibliographique à partir de 34 rapports sur les effets des conditions météorologiques dégradées sur la sécurité routière. Les résultats de cette méta-analyse sont sans équivoque. L'occurrence de précipitations entraîne une forte augmentation de la fréquence et de la sévérité des accidents : la pluie peut augmenter le taux d'accident de 71 % et le taux de blessés de 49 %, ces chiffres devenant plus élevés encore avec l'augmentation de l'intensité des précipitations. Cette tendance générale a été confirmée dans beaucoup de pays : au Canada, par exemple, une autre synthèse s'accorde sur l'augmentation du risque de 70 % [6]. En France, le phénomène a été analysé ([94, 112]) par l'observatoire national interministériel de sécurité routière (ONISR). Celui-ci chiffre ainsi à 13 % la part des accidents enregistrés par temps de pluie. Par ailleurs, en analysant plus finement les conditions favorisant un accident, une étude australienne a insisté sur l'importance de la date

de la dernière précipitation car, selon elle, l'effet des précipitations sera d'autant plus grand si beaucoup de jours sont passés depuis la dernière précipitation [42]. Les effets significatifs des précipitations en termes de sécurité et de mobilité, associés au peu d'études sur le sujet et à l'absence de stratégies de gestion de trafic météo-sensibles, mettent en lumière des enjeux économiques et sociétaux importants. Ces enjeux représentent par là même la principale motivation d'un programme de recherche exhaustif sur le sujet. De telles études sont possibles grâce aux avancées technologiques et aux politiques d'archivage des données, qui permettent aux chercheurs d'analyser conjointement des données trafic et météorologiques.

Contributions et cadre de la thèse

Objectifs et contributions

Ce travail de recherche se propose de contribuer à l'analyse et la modélisation des effets météorologiques sur le trafic, et plus précisément sur le comportement des conducteurs et la qualité de l'écoulement. La motivation de ce travail découle naturellement des quelques éléments soulignés dans cette introduction et du peu d'études sur ce sujet, à l'exception de celles menées en Amérique du Nord. Afin de pouvoir proposer dans un futur proche des stratégies de gestion de trafic et des outils d'aide à la décision prenant en compte le phénomène météorologique, l'objectif de cette thèse est triple :

1. proposer et appliquer une méthodologie d'analyse pour mieux comprendre et quantifier les effets météorologiques sur le trafic,
2. intégrer les résultats et le paramètre météorologique en général dans la modélisation théorique du trafic routier,
3. offrir un cadre propice à l'émergence d'outils d'aide à la décision pour la gestion du trafic.

Or, en considération de l'étendue des domaines abordés, aussi bien du point de vue du trafic routier que météorologiques, quelques précisions s'imposent quant au périmètre d'étude et aux phénomènes étudiés. Du côté du trafic, tout d'abord, ce travail se limitera à un périmètre inter- et péri-urbain, en analysant les comportements individuels des véhicules ou la dynamique du trafic sur des sections péri-urbaines ou autoroutières. Les études en milieu urbain liées à la météorologie existent, notamment sur des problématiques de réglages de phases de feux, mais ne seront pas abordées ici. D'autre part, les aspects liés à la sécurité ne seront pas abordés directement. Même si les effets négatifs sur la sécurité sont une des motivations principales du travail effectué, il n'y a pas de réel besoin de nouvelles analyses accidentologiques. La question des indicateurs de risque représente quant à elle une thématique liée qui ne sera pas non plus considérée. De plus, l'analyse du comportement des conducteurs s'effectuera par le truchement de l'analyse de données, mais la psychologie du conducteur ne sera pas abordée ici autrement que

par des interprétations de bon sens (même s'il est clair que l'approche comportementale et les apports de la psychologie présentent leur intérêt dans de tels domaines pluridisciplinaires).

Concernant les conditions météorologiques analysées, la disponibilité des données a également vite imposé une restriction du périmètre d'étude : celles-ci porteront principalement sur des phénomènes récurrents de précipitations (pluie), d'intensité faible à moyenne. Cependant, des études de phénomènes de plus forte intensité ou plus particuliers comme le brouillard, ou l'ensoleillement, pourraient très bien s'intégrer aux cadres méthodologiques présentés tout au long de ce document.

Plan de la thèse

Le travail résumé dans ce document revêt sans ambages un caractère pluridisciplinaire en convoquant des méthodes et concepts d'analyse de données, de mécanique des fluides, d'analyse numérique et des méthodes statistiques, probabilistes ou encore de traitement du signal. Cet aspect multidisciplinaire découle naturellement du sujet précis à traiter mais est aussi propre au domaine du trafic routier, domaine phare de la recherche appliquée qui peut faire intervenir un grand nombre de disciplines de par la diversité des phénomènes sous-jacents. La thèse est présentée en cinq chapitres, qui proposent de suivre un cheminement logique retraçant la démarche de recherche.

Le **chapitre 1** dresse un état de l'art des études existantes sur notre sujet. Cette synthèse bibliographique a permis de recenser le savoir existant et ses lacunes ainsi que les pistes de recherche les plus prometteuses quant à l'impact de la météorologie sur le trafic. Les études existantes traitent principalement le phénomène météorologique du point de vue de la demande ou d'un point de vue macroscopique. Des difficultés en résultent, nous semble-t-il, quant à la qualité et au volume des données, trafic ou météorologiques ; en outre, des facteurs exogènes, trop souvent négligés, sont à notre avis susceptibles d'influencer les résultats obtenus.

Nous soulignerons donc, au sein de ce chapitre introductif, l'absence d'une démarche méthodologique et d'analyse normalisée, que le **chapitre 2** contribuera à combler. En effet, nous développerons un cadre méthodologique rigoureux pour les futures analyses empiriques, ayant pour ambition d'appréhender au mieux la complexité des phénomènes étudiés. Plusieurs études statistiques seront ensuite proposées, dont les principales reposent sur des données trafic individuelles françaises et suisses. Il s'agira ainsi d'analyser les données trafic issues de capteurs boucles électromagnétiques en les couplant à une information météorologique. Les résultats présentés selon plusieurs niveaux d'analyses quantifieront précisément l'impact des précipitations en allant du comportement individuel des véhicules à celui d'un flot de trafic.

A ce stade, le **chapitre 3** proposera un cadre théorique original apte à reproduire les tendances mises en lumière par les analyses du chapitre 2. Nous aborderons d'abord le domaine générique de la modélisation du trafic, avant de présenter une typologie des modèles existants, ce qui nous permettra de justifier les choix effectués.

Nous contribuerons ensuite à l'enrichissement du complexe de modélisation, par la proposition d'une formulation de type Vlasov à partir de laquelle un nouveau modèle macroscopique du second ordre peut être dérivé. Certaines propriétés du modèle seront alors présentées, justifiant l'intégration d'un paramètre météorologique dans la modélisation macroscopique. Un accent tout particulier sera mis sur les possibilités supplémentaires offertes par les modèles du second ordre pour un tel objectif.

Le modèle introduit sera discrétisé dans le **chapitre 4** grâce à une méthode à pas fractionnaire qui permet de traiter successivement le terme source et la partie homogène du système. Pour traiter la partie homogène du système, nous proposerons un schéma numérique de type Lagrange-projection. Les propriétés du modèle, son comportement, ainsi que l'intégration du paramètre météorologique dans la modélisation, seront illustrés par la suite dans une série d'expériences numériques, qui confirmeront la bonne sensibilité du modèle face aux changements météorologiques.

Dans le **chapitre 5**, le travail porte sur les applications en ligne et l'intégration des nouvelles connaissances sur le phénomène météorologique dans des outils d'aide à la décision pour la gestion du trafic. Ces outils se fondent généralement sur des modèles de trafic, qui, s'ils sont sensibles aux conditions météorologiques, peuvent permettre à l'outil qui le compose de réagir en temps réel à leurs changements. Le travail proposé repose sur le filtrage bayésien avec une estimation du vecteur d'état du trafic. L'application d'une méthode de Monte Carlo séquentielle sur une section du périphérique lyonnais démontrera les bénéfices pour les gestionnaires de l'intégration des résultats sur les effets météorologiques.

Pour conclure, l'architecture générale de la thèse peut être résumé par la figure 1.

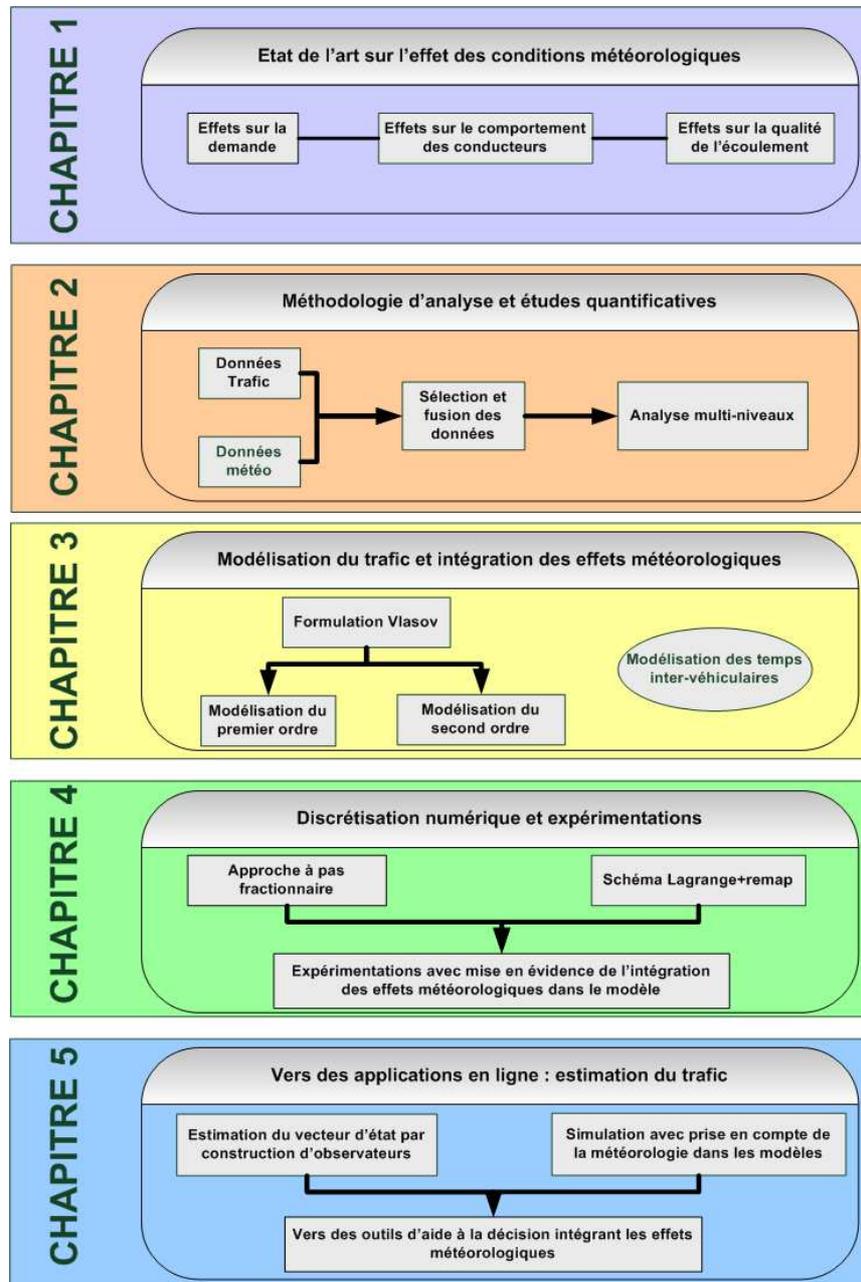


Figure 1 – Architecture générale de la thèse et découpage du travail réalisé.

Cadre de la thèse

Cette thèse s'est intégrée depuis son lancement à une initiative européenne portée par le Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transport de l'INRETS (LICIT), dans le cadre du programme COST : *European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research*.

Depuis mars 2008, l'action COST TU0702 (tu0702.inrets.fr) réunit des chercheurs provenant de 14 pays européens et 2 pays non européens partenaires (Aus-

tralie et Japon) sur le thème de la gestion de trafic par conditions météorologiques dégradées : "*Real-Time monitoring, surveillance and control of road networks under adverse weather conditions*". Les principaux objectifs de ce programme de recherche sont les suivants :

- une meilleure compréhension des effets météorologiques sur le trafic,
- le développement et la promotion d'outils d'aide à la décision minimisant ces impacts,
- la proposition de stratégies de gestion de trafic météo-sensibles.

Pour atteindre ces objectifs, trois groupes de travail ont été créés :

- Working Group 1 : Modélisation des effets météorologiques sur le trafic,
- Working Group 2 : Modélisation des effets météorologiques sur la chaussée,
- Working Group 3 : Fusion de données multi-sources (trafic et météorologiques).

Le travail de thèse s'est logiquement intégré aux travaux des groupes de travail 1 et 3 et la méthodologie proposée fut en accord avec celle de l'action en général, résumée sur la figure 2 :

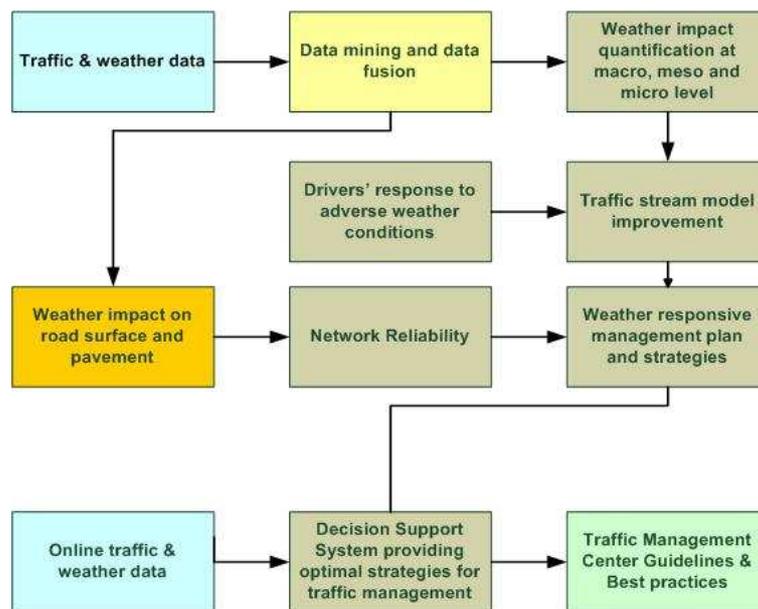


Figure 2 – Diagramme fonctionnel de l'action COST TU0702.

Dans ce cadre, nous avons effectué un séjour scientifique de courte durée à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), lors duquel nous avons pu réaliser l'analyse de données suisses. D'autre part, nous avons fortement contribué à alimenter un rapport de recherche édité par l'action COST TU0702 sur l'état de l'art des effets météorologiques sur le trafic.

Etat de l'art des effets des conditions météorologiques sur le trafic

Sommaire

1.1	Introduction	10
1.2	Caractérisation du trafic routier	10
1.2.1	Variables macroscopiques du trafic	10
1.2.2	Données trafic et leurs principales sources	14
1.2.3	Données météorologiques et leurs principales sources	16
1.3	Impact de la météorologie sur la demande	18
1.3.1	Effets sur les choix de déplacement et le report modal	18
1.3.2	Effets sur les volumes de trafic	20
1.3.3	Conclusion	23
1.4	Impact météorologique sur le comportement des conducteurs	23
1.5	Impact météorologique sur la qualité de l'écoulement	25
1.5.1	Effets sur la vitesse	25
1.5.2	Effets sur la capacité	27
1.5.3	Effets sur le diagramme fondamental	28
1.5.4	Effets sur les temps de parcours	30
1.6	Conclusion	31

1.1 Introduction

Ce premier chapitre dresse l'état de l'art de l'impact des conditions météorologiques sur le trafic routier. En résumant, de la manière la plus exhaustive possible, l'ensemble des connaissances et méthodes fournies à ce sujet par les travaux précédents, il apparaît d'emblée que le phénomène étudié est grandement protéiforme, rendant plus ardues les différentes analyses à mener pour l'appréhender dans son ensemble. Si une forme de connaissance pratique et de bon sens, tirée de nos propres expériences de conducteur/trice, atteste de l'influence en temps réel d'une météorologie dégradée sur le trafic, il n'en reste pas moins que d'autres facteurs peuvent complexifier l'appréhension du phénomène.

En premier lieu, la difficulté réside dans la modification en amont de la demande en trafic, c'est-à-dire du nombre d'usagers sur le réseau et de leurs choix de déplacement. Cet aspect constitue déjà en soi un sujet de recherche dont les principales conclusions seront résumées dans la section 1.3.

Dans un deuxième temps, les apports des études abordant les effets concrets d'une météorologie dégradée sur le trafic seront exposés, ordonnés selon deux axes de recherche qui correspondent à autant d'échelles d'analyse : au niveau microscopique (section 1.4), les véhicules sont analysés individuellement et il apparaît que le comportement des conducteurs est altéré *via* une dégradation de l'état de la chaussée, une diminution de la visibilité. Les grandeurs affectées par cette gêne seront naturellement les vitesses individuelles, les temps inter-véhiculaires, les inter-distances. A un niveau macroscopique (section 1.5), un certain nombre de travaux mettent en lumière un report de ces effets microscopiques sur les variables caractéristiques d'un flot de véhicules : baisses de la vitesse moyenne, du débit et la concentration. Il est clair que la conjonction de ces deux types de résultats va entraîner des variations de temps de parcours par météorologie dégradée, comme le résumant quelques études.

Cette synthèse bibliographique, établissant un panorama le plus complet possible (même si forcément sélectif) des principales conclusions des précédents travaux sur notre thème, devrait également soulever leurs faiblesses et lacunes nous ayant poussé à entreprendre de nouvelles investigations. Une critique de la littérature existante clora ce chapitre et introduira par la même occasion les études empiriques présentées dans le chapitre suivant. Mais avant tout, les données étant notre matériau de base, il convient de débiter ce chapitre par une présentation des variables considérées, ainsi que des différentes sources de données, trafic ou météorologiques, sur lesquelles se fondent les analyses existantes ou menées dans ce travail (section 1.2).

1.2 Caractérisation du trafic routier

1.2.1 Variables macroscopiques du trafic

Si, à un niveau microscopique d'analyse, les variables caractéristiques des véhicules (vitesses individuelles, temps et distances inter-véhiculaires), et leur mesure, sont assez intuitives, il apparaît que la description macroscopique du trafic, qui constitue la spécificité de ce domaine, et, a ouvert la voie à d'importants travaux de modélisation, doit faire l'objet d'une description préalable afin de mieux présenter les

différentes variables considérées par la suite. Au niveau macroscopique, l'écoulement du trafic est assimilé à celui d'un fluide dans un canal et le trafic est décrit par des lois analogues à celles de la mécanique des fluides. On s'intéresse donc à l'évolution d'un flot de véhicules, c'est-à-dire à un ensemble de véhicules empruntant une voie pendant une période donnée. Un flot de véhicules est caractérisé par trois variables globales : le débit q , la concentration ρ (aussi bien notée k en théorie du trafic) et la vitesse u . Ces trois variables sont liées par une des principales lois de la mécanique des fluides :

$$q = \rho u. \quad (1)$$

Le débit est le nombre de véhicules N passant en un point x pendant une période de temps Δt , à savoir

$$q_{\Delta t}(x) = q(x, t \rightarrow t + \Delta t) = \frac{N}{\Delta t}. \quad (2)$$

Le débit représente donc une mesure temporelle exprimée en nombres de véhicules par unité de temps (veh/h ou veh/s). Il est intéressant de noter que le débit pour une période donnée est relatif au temps inter-véhiculaire moyen pour cette même période. La concentration ρ , représente quant à elle le nombre de véhicules M présents sur une section de route $[x, x + \Delta x]$ à un moment donné :

$$\rho_{\Delta x}(t) = \rho(x \rightarrow x + \Delta x, t) = \frac{M}{\Delta x}. \quad (3)$$

C'est une mesure spatiale exprimée en nombre de véhicules par unité de longueur (veh/km ou veh/m). La concentration sur un intervalle de longueur donné est égale à l'inverse de la distance inter-véhiculaire moyenne sur la longueur considérée. Souvent, les données issues des boucles électromagnétiques fournissent une estimation indirecte de la concentration à travers le taux d'occupation (TO), construit à partir du temps θ_i pendant lequel la boucle électromagnétique détecte un signal, qui est lié à la vitesse V_i du véhicule i , à sa longueur L_i , ainsi qu'à la longueur de la boucle l :

$$\theta_i = \frac{l + L_i}{V_i}. \quad (4)$$

Si N véhicules successifs ont traversé la boucle pendant une période Δt , le taux d'occupation (TO), exprimé en pourcentage, correspond à la fraction de temps pendant laquelle la boucle électromagnétique a été occupée [19] :

$$TO(t \rightarrow t + \Delta t) = \frac{100}{\Delta t} \times \sum_{i=1}^N \theta_i. \quad (5)$$

Pour retrouver la concentration ρ à partir du taux d'occupation, une hypothèse simplificatrice consiste à considérer que tous les véhicules ont la même longueur L , ce qui donne

$$\rho = \frac{TO}{100 \times (l + L)}. \quad (6)$$

La vitesse moyenne du flot u représente quant à elle la vitesse moyenne spatiale

$$V_{\Delta x}(t) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M V_j(t). \quad (7)$$

qui est différente d'une vitesse moyenne temporelle. Pour traiter les données individuelles de type boucle, on peut montrer aisément que la vitesse moyenne spatiale *arithmétique* (vitesse du flot u) correspond à la vitesse moyenne temporelle *harmonique*.

La vitesse du flot lie donc le débit et la concentration par la relation $q = \rho u$. La forme de la relation entre deux de ces trois grandeurs va définir le diagramme fondamental. Le diagramme fondamental représente une relation phénoménologique qui constitue un instrument essentiel de la théorie du trafic. La première représentation du diagramme fondamental part certainement d'une relation linéaire entre la vitesse et la concentration, proposée par Greenshields en 1935 [55] (figure 1.1). La figure 1.1 montre la forme des trois types de relations que l'on peut déduire à partir de ce postulat, entre vitesse et concentration, débit et vitesse, et vitesse et débit. Parmi les autres formes du diagramme fondamental, citons les formes logarithmiques et exponentielles proposées par Greenberg [56] et Underwood [137]. Cette relation fondamentale prend une part prépondérante dans les modèles macroscopiques fluides du trafic, qui seront abordés plus en détails dans le chapitre 3.

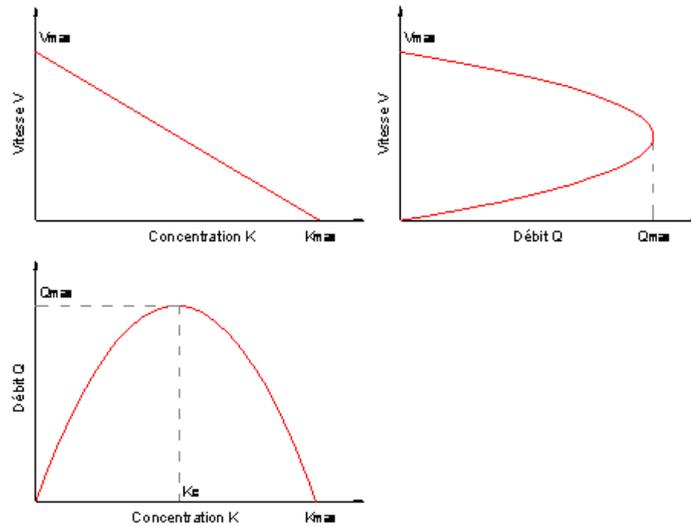


Figure 1.1 – Propositions de Greenshield pour la forme du diagramme fondamental [55].

En s'intéressant à la relation entre débit et concentration, on peut voir que lorsque la concentration est faible, le débit croît de manière presque linéaire (ou parabolique selon la forme choisie) jusqu'à un débit maximum q_{max} correspondant à la capacité de la voie. Ce débit est atteint lorsque la concentration de véhicules atteint sa valeur critique, notée K_c ou ρ_c . Avant cette valeur critique, plus les véhicules sont nombreux sur la section (concentration), plus ils sont nombreux à passer en un point donné de cette dernière (débit) : la demande est inférieure à

l'offre. Passée la concentration critique, c'est-à-dire une fois que la capacité (débit maximum) de la voie est atteinte, la demande est supérieure à l'offre, le débit diminue et la concentration augmente jusqu'à atteindre la concentration maximale K_{max} ou ρ_M (tous les véhicules sont arrêtés), nommée en anglais *jam density*.

Notons également que la vitesse libre u_f ou V_f , qui correspond à la vitesse maximale à laquelle le flot tendrait à s'écouler sans aucune contrainte (*free-flow speed*), représente la pente de la relation débit-concentration dans la partie dite fluide. D'ailleurs, la forme du diagramme fondamental la plus utilisée actuellement traduit une insensibilité de la vitesse libre par rapport à la concentration dans la partie non congestionnée, fluide. Cette relation dite à deux régimes consiste simplement en un diagramme triangulaire liant le débit et la concentration (figure 1.2).

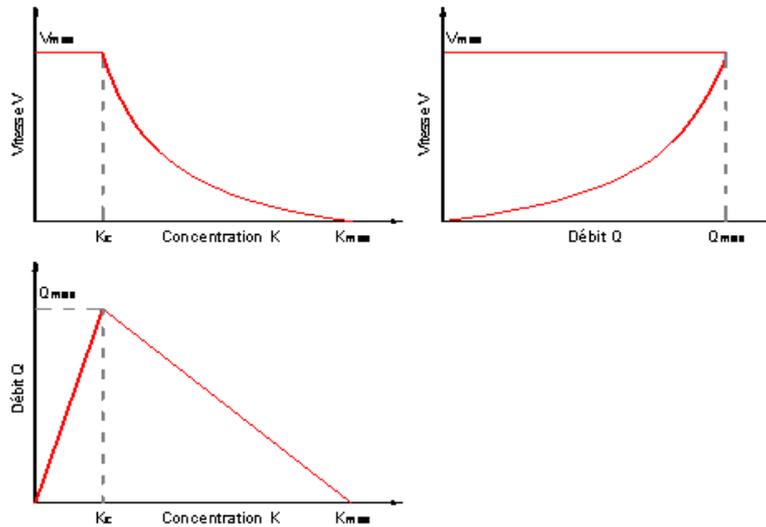


Figure 1.2 – Diagramme fondamental triangulaire.

Le diagramme fondamental permet d'introduire les variables les plus utilisées par les gestionnaires d'infrastructures, qui seront logiquement les variables les plus représentées dans les différents travaux de recherche. La capacité q_{max} représente ainsi une variable essentielle dans la gestion du trafic, qui vise, entre autres, à mieux comprendre la congestion et à en réduire les effets. La congestion apparaît en effet lorsque la demande, c'est-à-dire le nombre de véhicules souhaitant s'écouler sur une infrastructure donnée, exprimée en termes de débit, est supérieure à la capacité de l'infrastructure. Une bonne estimation de cette capacité va donc de pair avec une meilleure caractérisation de la congestion. Mieux comprendre les impacts météorologiques sur la capacité mais aussi sur la vitesse libre et l'ensemble des paramètres du diagramme fondamental permettrait ainsi une meilleure gestion du réseau.

1.2.2 Données trafic et leurs principales sources

Données issues du système GNSS (Global Navigation Satellite System), véhicules traceurs, données de trajectoires, téléphonie mobile etc. : il ne fait aucun doute que le recueil et l'usage de nouvelles sources de données se développent et continueront à se développer dans le futur, au gré toutefois pour les moyens les plus récents, de questionnements éthiques incontournables sur la question de la confidentialité des données. Mais bien avant cet élargissement du "champ des possibles", les mesures de trafic ont dû se déployer pour répondre aux besoins d'exploitation et de régulation des flux, d'optimisation du réseau, et représenter pour l'exploitant un moyen efficace d'évaluation et de régulation. Au début des années 1990, l'Etat a mis en place le réseau SIREDO (Système Informatisé de REcueil de DONnées), vaste ensemble de stations destiné à recueillir des informations sur le réseau routier et autoroutier français. Eu égard aux problématiques de gestion du trafic précédemment exposées, ces données trafic permettent la connaissance des conditions de circulation et l'évaluation des performances et des mesures de gestion. Si les premiers besoins se satisfaisaient de données moyennes journalières annuelles, les problèmes de saturation du réseau ont vite soulevé l'importance d'un stockage plus massif en vue d'une exploitation en temps réel. Les mesures de trafic du réseau SIREDO, tout comme les données recueillies par les gestionnaires privés d'autoroutes, sont issues de capteurs géoréférencés. C'est ce type de capteur qui est principalement disponible à l'heure actuelle pour les analyses et qui a été uniquement utilisé dans ce travail de thèse.

Il ne serait pas dès lors inutile de décrire, même de manière concise, le type de fonctionnement de cette source de données. Un capteur de trafic est ainsi un instrument de mesure qui réagit à la variation d'un signal électromagnétique au passage des véhicules, transformant cette information en un signal utilisable par un détecteur. Le détecteur est un dispositif associé au capteur qui transforme le signal en une forme appropriée au comptage et aux futurs traitements. En d'autres termes, une station de mesure est composée d'une unité de détection (couple capteur-détecteur) qui transmet l'information à une unité de traitement (alimentation, unité centrale) qui alimente et stocke les données qui seront extraites par l'exploitant. Selon le guide du SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), les capteurs de trafic peuvent être classés en trois catégories [95], par finalités :

- implantation dans ou sur la chaussée pour la détection d'essieu,
- implantation dans ou sur la chaussée pour la détection de véhicule dans son ensemble,
- positionnement en bordure de chaussée ou en aérien, et pouvant couvrir une zone ou un volume.

Plus ancien et plus rustique, le tuyau pneumatique est un capteur bien adapté à des mesures ponctuelles de débits ou de vitesses, encore assez utilisé par les exploitants et présentant un intérêt pour des cas précis (mesures à des passages à niveaux, franchissement des bandes d'arrêt d'urgence). Parmi les capteurs non intrusifs, citons les capteurs lasers, radar doppler, infra-rouges, et surtout les caméras vidéo qui peuvent compléter le recueil classique par des informations plus riches (nombre de changements de voies, suivi de véhicules, mesures de densités). Malheureusement,

ces dispositifs sont encore coûteux à l'heure actuelle et les données sont limitées à des opérations ponctuelles sur des zones très limitées. Les données utilisées dans cette thèse sont issues de capteurs intrusifs de type *boucles électromagnétiques*, qui est le dispositif de mesures le plus répandu, en France et à l'étranger, pour des réseaux divers (urbains ou inter-urbains). Dans le cadre du schéma de déploiement SIREDO, de 25000 à 30000 boucles ont ainsi été posées en France depuis le début des années 90 [95]. Un tel capteur, de type intrusif, noyé dans la chaussée, peut être composé d'une ou deux boucles électromagnétiques (figure 1.3).



Figure 1.3 – Photo de boucles électromagnétiques (réseau OFROU, suisse).

Une boucle électromagnétique est constituée de spires de fil de cuivre isolées. Ce capteur représente un transducteur physique dont l'inductance varie avec la présence d'une masse métallique (un véhicule) dans son champ magnétique. Avec une seule boucle par voie, les variables mesurées sont le débit et le taux d'occupation. Avec deux boucles par voie séparées par une distance connue (figure 1.3), il est aussi possible d'avoir la vitesse instantanée. De ces précédentes variables se déduisent les temps et distances inter-véhiculaires. En ajoutant la possibilité de détecter la longueur d'un véhicule et le nombre d'essieux, les véhicules peuvent être classés en catégories (au nombre de 14 pour l'exemple du programme SIREDO).

A partir de ces paramètres de base, un échantillon de données trafic va se caractériser par sa granularité, nommée aussi séquençement ou échantillonnage, qui découle des périodes d'agrégation de données retenues pour l'archivage des données. Ceci va mener à plusieurs types de données, qui autorisent/interdisent *de facto* certains niveaux d'analyses statistiques :

- Données individuelles : l'entité statistique est le véhicule et les enregistrements sont stockés véhicule par véhicule, ce qui permet d'analyser des comportements microscopiques.
- Données agrégées sur un pas de temps Δt : l'agrégation est réalisée par pas de temps variables pour des analyses globales de débits, vitesses, taux d'occupation etc. Dans le cas d'un pas de temps élevé, *i.e.* données horaires, mensuelles

ou annuelles, les données génèrent des études de capacité ou statistiques à long terme.

Ainsi, plus le pas d'agrégation augmente et plus la dynamique du trafic se trouve noyée, les données autorisant de moins en moins d'analyses fines. Dans le cadre de la caractérisation des effets météorologiques sur le trafic, ces données trafic doivent être associées à une information météorologique pertinente, vis-à-vis de laquelle la granularité, aussi bien spatiale que temporelle, prendra toute son importance.

1.2.3 Données météorologiques et leurs principales sources

Le couplage de données trafic et météorologiques constitue l'étape préalable aux analyses statistiques sur la quantification des effets météorologiques sur le trafic. Il convient tout d'abord de préciser que la recherche en météorologie n'est aucunement abordée dans notre travail, même si des échanges avec les experts météorologistes se sont relevés indispensables. Ainsi, Les travaux concernent essentiellement le trafic routier du point de vue de sa dynamique et de sa modélisation et il s'agit de mieux comprendre et prendre en compte l'effet que pourrait avoir un phénomène météorologique exogène, le plus souvent la pluie, d'un point de vue empirique puis théorique. Les observations météorologiques peuvent provenir de stations météorologiques classiques (de type Météo-France) ou de capteurs météo-routiers spécifiques (figure 1.4).

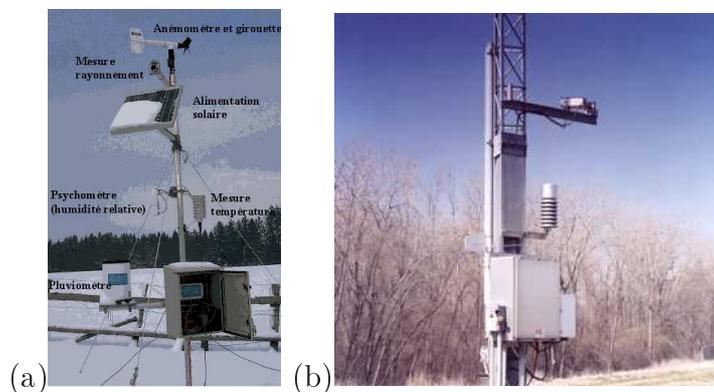


Figure 1.4 – (a) Station météorologique standard. (b) Station météo-routière. [106].

La mesure des données météorologiques au niveau de la chaussée est garante de leur pertinence spatio-temporelle. Toutefois, pour la majeure partie des infrastructures routières, les données issues de stations météo-routières ne sont pas ou peu disponibles, leur usage se limitant à la viabilité hivernale. Ce type de données n'est pour ainsi dire pas ou peu utilisé ni même stocké par les gestionnaires en comparaison des données trafic. Cette difficulté d'accès aux données relève de la conjonction du nombre modeste de stations météorologiques (en Europe au moins) et de l'incompatibilité avec des intérêts privés que sous-tend parfois la cession de données (ex : sociétés privées de gestion d'autoroutes). Ainsi, nous sommes amenés à nous tourner vers des sources secondaires, les stations météorologiques des organismes nationaux (ex : Météo-France). C'est pourquoi la qualité de l'information météorologique et

plus particulièrement sa précision, aussi bien spatiale que temporelle (les données peuvent être agrégées sur des périodes variables) devient un véritable enjeu qui a notamment mené le gouvernement américain à lancer un vaste programme de gestion du réseau routier qui intègre dans une base de données commune les sources de données trafic et météorologiques (www.clarusinitiative.org/).

Les variables météorologiques mesurées par différents instruments composant les stations sont les suivantes :

- Les précipitations : occurrence, type de précipitations, intensité et accumulation des précipitations (pluviomètres).
- Le vent : vitesse (anémomètres) et direction (girouette).
- Le rayonnement solaire : les mesures portent d'une part sur l'intensité du rayonnement direct, et d'autre part sur celle de rayonnement sous sa forme diffuse. Les instruments utilisés sont désignés sous le nom général d'actinomètre.
- La température : l'instrument de mesure de la température est le thermomètre qui est protégé sous un abri météorologique.
- L'humidité de l'air : le taux d'humidité dans l'air est mesuré avec un instrument appelé hygromètre. Pour la détermination simultanée de la température de l'air et de l'humidité, on utilise un psychromètre. Cet appareil est le plus précis pour la mesure de l'humidité.
- La pression atmosphérique : les instruments utilisés sont le baromètre à liquide ou le baromètre mécanique (aéroïde), installés sous abri météorologique.

Si les types de données fournies par les stations sont donc nombreux, on note cependant que les études croisant l'information routière et météorologique portent principalement sur l'effet du vent et des précipitations sur le trafic, dans toutes ses composantes. On peut encore distinguer parmi ces études celles portant sur l'analyse des événements extrêmes (tempêtes, orages, épisodes neigeux violents) et celles s'intéressant aux événements récurrents (précipitations, vent, visibilité). De prime abord, une difficulté se situe au niveau des échelles de mesure des différents phénomènes. Si un phénomène comme le vent dispose de sa propre échelle, dite de Beaufort, il n'en est pas de même pour les précipitations, sujet principal de ce travail. Ainsi, on peut légitimement s'interroger sur la signification d'un terme comme "pluie forte" en France, en Finlande, ou au Japon. A l'instar des échelles de nuisance sonore, la gêne est variable d'un individu à l'autre, et plus généralement d'une région à l'autre, que ce soit à l'intérieur d'un même pays ou entre différentes régions du monde. Pourtant, le découpage d'un phénomène météorologique continu comme la pluie en plusieurs classes d'intensité revêt, dans une optique de caractérisation des effets du phénomène, toute son importance. Dans un effort de normalisation, la société américaine de météorologie (www.ametsoc.org) définit les classes de précipitations (sous forme liquide) de la façon suivante :

- Précipitations légères : $[0 - 2.5]$ mm/h,
- Précipitations modérées : $[2.6 - 7.6]$ mm/h,
- Précipitations fortes : ≥ 7.6 mm/h.

Dans les études qui jalonnent ce travail, les classes de précipitations ont été construites à partir de recommandations d'experts météorologistes. De par l'hétérogénéité induite par l'absence de standard sur ce sujet, les différentes classes d'intensité seront précisées au cas par cas et un soin particulier devra être pris pour intégrer cette difficulté dans les comparaisons des études existantes et des résultats à venir.

1.3 Impact de la météorologie sur la demande

Par demande, nous considérons ici la définition adoptée en théorie du trafic, c'est-à-dire la quantité de trafic qui cherche à s'écouler sur une infrastructure. Une distinction doit être faite entre demande de déplacement et demande de trafic, qui est liée à l'échelle de représentation. A l'échelle du réseau, la demande de déplacement correspond au nombre total de déplacements qui cherchent à être réalisés par des acteurs de déplacement selon un ensemble de modes disponibles, alors que la demande de trafic en un point précis d'une infrastructure donnée ne porte que sur le trafic, mesuré par le débit. En cas de trafic saturé (congestion) et selon l'endroit de mesure, cette mesure se réduit à celle de l'offre sur une infrastructure, c'est-à-dire le flux de véhicules pouvant s'écouler sur celle-ci.

Partant de ces préliminaires terminologiques, il semble indispensable de présenter un état de l'art des effets météorologiques sur la demande de déplacement et la demande de trafic. Comme nous le rappellent Koetse et Rietviel [87], le phénomène peut être abordé sous plusieurs angles : tout d'abord, des régions climatiquement différentes (ex : Maroc/Finlande) peuvent être comparées et confrontées par l'étude des structures des déplacements. D'autre part, à l'intérieur d'un pays, les variations saisonnières peuvent être étudiées. Compte-tenu des objectifs généraux de notre travail, nous nous focaliserons sur les études relatant les effets directs d'un changement météorologique sur le comportement des usagers. Dans un premier temps, nous verrons qu'un certain nombre d'enquêtes et de sondages s'est intéressé aux variations des choix de déplacement (annulation, modification, génération de déplacements, choix du mode, de l'heure) face à des conditions météorologiques dégradées. Dans un second temps, nous verrons comment ces modifications de choix peuvent se répercuter sur les volumes moyens de déplacement (la demande de trafic) : des comptages véhiculaires provenant de boucles électromagnétiques nous éclairent sur les variations de volume et permettent de comparer les débits moyens sur des sections données, en fonction de diverses conditions météorologiques.

1.3.1 Effets sur les choix de déplacement et le report modal

Les impacts météorologiques sur la demande peuvent être mieux appréhendés à travers le prisme du modèle à quatre étapes, bien connu dans la planification du transport. Aux quatre étapes composant ce modèle, à savoir génération, distribution, choix modal et affectation peut s'ajouter une composante relative au choix de l'heure de départ [87]. La figure 1.5 résume les différentes formes que peut prendre l'influence météorologique dans ce formalisme.



Figure 1.5 – Modifications possibles des choix de déplacement en cas de conditions météorologiques dégradées (adapté de [21] avec la permission de l'auteur).

Quelques enquêtes ont permis de voir la façon dont les usagers perçoivent et/ou utilisent l'information météo-routière. En Finlande, Sihvola [129] a effectué un sondage en interrogeant pendant l'hiver 2007/2008 les usagers à des stations-service ou près des routes. Les résultats soulignent qu'une majorité d'usagers a reçu ou recherché une information sur les conditions de circulation et météorologiques avant ou pendant leur trajet. 20 % des interrogés ont en particulier changé ou pensé à changer les modalités de leur trajet à cause des conditions météorologiques, cette prise d'information dépendant de l'expérience du conducteur, de la durée du trajet ou de l'habitude à l'effectuer.

La première phase du modèle à quatre étapes est celle dite de génération, qui correspond à la décision prise par l'individu de se déplacer ou non. En cas de mauvaises conditions météorologiques, toutes les enquêtes s'accordent à dire que cette décision est fortement liée au motif du déplacement et à sa flexibilité [87, 101]. Ainsi, les déplacements pendulaires (de type trajet domicile-travail) seront peu affectés contrairement à d'autres, liés aux loisirs [82]. Il faut donc chercher du côté des heures creuses, ou des week-ends, pour mettre en évidence ce phénomène d'annulation. Ces annulations de déplacements sont naturellement corrélées à l'intensité du phénomène météorologique, comme le confirment plusieurs études [5, 58, 148], même si là les variabilités régionales et culturelles pondèrent l'ampleur de ces phénomènes.

Au niveau de l'étape de distribution, l'effet de la météo sur la structure de la matrice origine-destination est analysé. Koetse *et al.* [86] considèrent qu'un événement météorologique ponctuel peut potentiellement mener à un changement de destination, surtout en cas d'un déplacement lié aux loisirs. Cependant, peu d'éléments nous permettent de décrire précisément ce phénomène de changement de distribution à court terme. Le choix modal est quant à lui beaucoup plus abordé dans

la littérature. En effet, le changement de mode s'avère être le seul degré de liberté par rapport à l'inflexibilité des déplacements pendulaires domicile-travail, qui restent les plus étudiés dans la bibliographie [60]. Cependant, ce type d'étude, généralement fondé sur des enquêtes, doit être relativisé de par la taille versatile des échantillons d'une étude à l'autre, les différences saisonnières ou régionales, et également l'aspect déclaratif de la réponse à un sondage qui n'est pas toujours en adéquation avec la pratique réelle. Ainsi, si certaines études s'accordent sur l'existence d'un report modal significatif lié à de mauvaises conditions météorologiques [9,39,81,127], d'autres tendent à le minimiser [1,61,68].

L'étape d'affectation correspond au choix précis de l'itinéraire par l'utilisateur entre l'origine et la destination, en tenant compte du mode choisi. Cette décision est souvent prise à court terme et peut être influencée par les conditions météorologiques [39,80,81]. Il est bien évident que ces éventuelles modifications dépendraient de la nature du déplacement et de sa flexibilité, comme le rappellent Koetse *et al.* [86]. Similairement aux annulations de déplacement, les reports sont rendus possibles par la contingence de certains déplacements, tout particulièrement ceux liés aux loisirs. Les déplacements pendulaires seront quant à eux peu touchés, les automobilistes ayant plutôt tendance à avancer leur heure de départ pour arriver à l'heure habituel sur leur lieu de travail [39,81]. Il faut préciser qu'il n'existe pas encore de système de guidage qui intègre la météorologie dans le coût généralisé du déplacement. Implicitement, chaque usager intègre donc l'effet météorologique dans son évaluation du coût du déplacement (*i.e.* temps de parcours plus élevé), au même titre que d'autres perturbations comme les grèves par exemple.

Cette altération dans les choix et les modalités de déplacement des usagers, c'est-à-dire dans la structure de la demande, va inévitablement se reporter sur les volumes moyens de déplacement, comme l'ont souligné un certain nombre d'études synthétisées dans la section suivante.

1.3.2 Effets sur les volumes de trafic

Avant l'avènement des nouvelles sources de données (données GPS, transactions péages, flotte équipée), les comptages véhiculaires étaient effectués par des boucles électromagnétiques implantées dans la chaussée (voir section 1.2), qui fournissaient un débit de véhicules par pas d'agrégation temporelle variables. Les études portant sur l'impact météorologique sur la demande de trafic se fondent donc sur des comparaisons de volumes moyens par temps sec et dégradé. Cette comparaison n'est pas aisée car plusieurs facteurs modifient, nous l'avons vu, la structure de la demande (figure 1.5), et il convient donc de prendre des précautions quant aux conclusions de certaines études présentes dans la littérature. Ainsi, une anticipation ou un report d'un déplacement peut biaiser la mesure du volume si l'échelle temporelle est petite tandis qu'un changement d'itinéraire peut également influencer le volume si l'étendue spatiale n'est pas suffisante. Un changement de mode de transport peut également avoir son importance si l'étude ne se concentre que sur une certaine catégorie de véhicules. De même, une étude sera d'autant plus pertinente que les comparaisons de volumes s'effectueront pour les périodes pour lesquelles les conditions météoro-

logiques étaient assurément mauvaises (par exemple, il est inutile de comparer un volume quotidien par temps sec avec un volume quotidien concernant une journée ayant connu seulement 2 heures de précipitations).

Cas de la pluie

Au Royaume-Uni, Codling [27] fut l'un des premiers à s'être intéressé à la réduction des débits par temps de pluie par le truchement de données accidentelles. Au cours des décennies qui ont suivi, les données trafic mesurées par les capteurs ont permis de réaliser des comparaisons des volumes journaliers moyens par temps sec et météorologie dégradée. En ce qui concerne l'impact de la pluie sur la demande, les différentes études rapportent finalement de faibles réductions du volume, comme le résume le tableau 1.1.

Région	Nature du réseau	Réductions observées	Réf.
Grande-Bretagne	urbain/interurbain	1-2 % en semaine, jusqu'à 17.8 % le dimanche	Codling [27]
Etats-Unis	urbain	<1 % en semaine, 9 % le week-end	Changnon [22]
Pays-Bas	interurbain	non significatives	Hogema [68]
Ecosse	urbain/interurbain	-4.73 % le week-end pour des volumes de pluie hors des normales saisonnières	Hassan [61]
Japon	urbain	si $\geq 13\text{mm/jour}$: -2.9 % en semaine, -7.9 % le samedi, -5.2 % le dimanche	Chung [25]
Australie	urbain	-1.04 % en journée, -2.61 % la nuit	Keay [79]

TAB. 1.1 – Synthèse des réductions de volume du trafic routier causées par la pluie.

Si l'on peut parfois regretter la faible taille des échantillons de données et douter de la qualité de l'information météorologique [22, 68], les conclusions des différentes études convergent vers une faible réduction, plus significative les week-ends qu'en semaine [22, 61, 79]. Cette tendance est confirmée par l'étude japonaise de Chung *et al.* [25] qui ont analysé les effets de la pluie sur la demande à partir des données du vaste réseau MEX (Metropolitan EXpressway) de Tokyo. Les auteurs ont complété leur travail par une analyse de sensibilité des résultats par rapport au choix du seuil pour la définition d'un jour pluvieux. Les résultats, reportés sur la figure 1.6, confirment bien que la baisse de la demande augmente avec l'intensité des précipitations et que les week-ends sont plus touchés par ce phénomène.

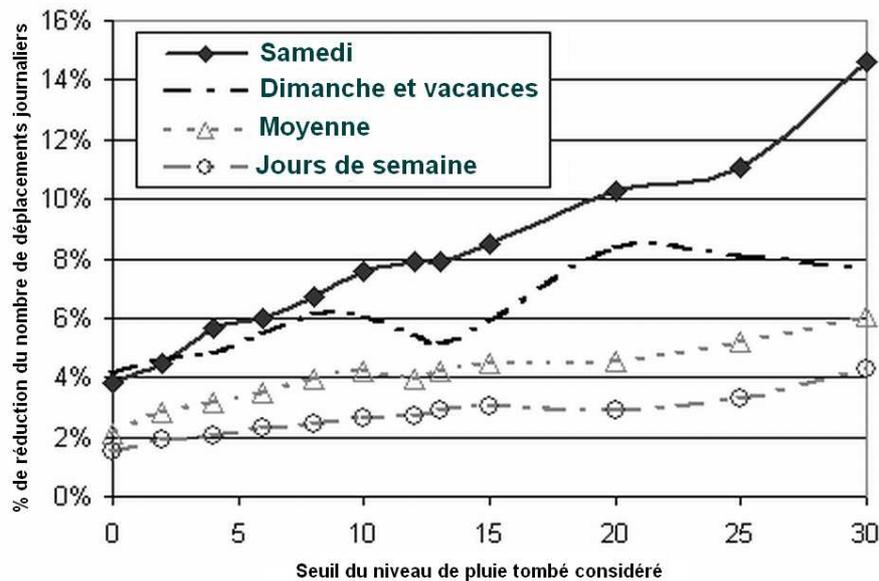


Figure 1.6 – Réduction des volumes de trafic en fonction du niveau de pluie et du jour de la semaine (reproduit à partir de [25]).

Ces quelques résultats mettent ainsi en évidence une légère influence de la pluie sur les volumes de trafic. Il est logique d'attendre des effets plus conséquents en cas d'épisodes neigeux, comme le synthétise le paragraphe suivant.

Cas de la neige et autres phénomènes

Ce type d'événement a été largement analysé en Amérique du nord. Ce sont plus précisément les tempêtes de neige qui ont fait l'objet d'un nombre conséquent de travaux [35,58,85,100,101] et les baisses de volumes sont beaucoup plus significatives qu'en cas de pluie. Comme pour la pluie, les réductions de volume sont fonctions de l'heure de la journée, du jour de la semaine, et de l'intensité du phénomène (tableau 1.2).

Région	Nature du réseau	Réductions observées	Réf.
Etats Unis	autoroute	20 % en moyenne	Maze [101]
Etats-Unis	autoroute	15 à 30 %	Maki [100]
Etats-Unis	autoroute	16-47 %, 29 % en moyenne	Knapp [85]
Etats-Unis	autoroute/interurbain	7-53 % en semaine, 19-56 % le W.E.	Hanbali [58]

TAB. 1.2 – Synthèse des réductions de volume du trafic routier causées par la neige.

Les épisodes neigeux violents, et plus particulièrement les tempêtes de neige, sont par définition associés à de basses températures et des vents moyens à forts.

L'effet des températures sur les volumes, en particulier les basses températures, a d'ailleurs, quand il n'est pas indirectement traité, été passé au crible par certains auteurs précédemment cités [61,79,85,101]. Le vent représente un facteur aggravant des réductions de volumes par météorologie dégradée : Knapp *et al.* [85] ont ainsi mis en évidence son impact direct sur le trafic routier dans le cas particulier d'une tempête de neige. Les auteurs établissent un modèle qui lie le pourcentage de réduction de trafic les jours de tempêtes, la quantité totale de neige tombée et le carré du maximum de la vitesse des rafales de vent. La réduction du débit croît ainsi linéairement avec le carré de la vitesse du vent.

1.3.3 Conclusion

Lors de conditions météorologiques dégradées, la modification de la structure de la demande et les réductions de volume qui en découlent sont des phénomènes complexes qui vont dépendre de plusieurs paramètres. La neige et la pluie sont les deux événements météorologiques les plus étudiés dans la littérature. Tout d'abord, l'ampleur du facteur météorologique doit être suffisante pour que son impact se traduise sur le trafic ou le comportement des usagers. Cette perception varie forcément selon les caractéristiques propres de l'utilisateur et les différences culturelles entrent en jeu : pour un certain seuil de précipitation, une enquête réalisée dans une région fréquemment soumise au froid et aux précipitations relèvera un effet moindre par rapport à son application dans un pays au climat plus tempéré, où les usagers sont moins habitués à un phénomène de cette intensité. Toutefois, sans oublier cet obstacle fondamental à un possible consensus dans la quantification des résultats, force est de constater que des invariants apparaissent au gré des différentes études. Le motif du déplacement prend une place prépondérante dans les réactions des usagers. Les trajets peu flexibles de type domicile-travail sont très peu annulés, mais peuvent être anticipés ou retardés selon les caractéristiques propres à chaque usager, tandis que les déplacements liés aux loisirs sont assez touchés par les annulations ou les reports. Il s'ensuit que les baisses de volume par rapport aux débits moyens de référence seront plus conséquentes les week-ends qu'en semaine. D'un point de vue opérationnel, il semble que le phénomène auquel nous nous intéressons plus précisément dans la suite de ce manuscrit, à savoir la pluie, n'a pas encore convaincu les gestionnaires quant à la nécessité de sa prise en compte dans l'analyse de la demande.

1.4 Impact météorologique sur le comportement des conducteurs

Au-delà des effets structurels sur la demande en trafic, de mauvaises conditions météorologiques influencent directement les comportements individuels des conducteurs. Ainsi comme le rappelle Goodwin en 2002 [54], la météorologie agit au niveau microscopique d'analyse par une altération de l'adhérence du véhicule, de la visibilité du conducteur et des performances globales du véhicule. Intuitivement, ces différents éléments devraient amener les usagers à adapter leurs vitesses, leurs

temps et leurs distances inter-véhiculaires. Dans l'ensemble des références bibliographiques liées à ce sujet, très peu d'études viennent toutefois étayer ces hypothèses. Le projet INTRO *routes intelligentes* (2005-2008) s'est intéressé à l'intégration des effets météorologiques dans les indicateurs de prévision du trafic. Des données trafic suisses, françaises et polonaises ont été analysées pour quantifier les relations entre les événements météorologiques et différents paramètres caractérisant le trafic. Concernant les temps inter-véhiculaires (TIV), les conclusions sont les suivantes : lors de conditions météorologiques normales, la plupart des conducteurs maintiennent des TIV courts, aidés pour cela par une bonne visibilité et des distances de freinage courtes (bonne adhérence de la chaussée). En revanche, une dégradation des conditions météorologiques affecte la visibilité, l'état de la surface de la chaussée, et mène les conducteurs à augmenter leurs temps inter-véhiculaires. La figure 1.7 illustre ces comportements. Pour une certaine classe de débits (500-600 veh/h), la densité des temps inter-véhiculaires courts diminue à mesure que l'intensité des précipitations augmente.

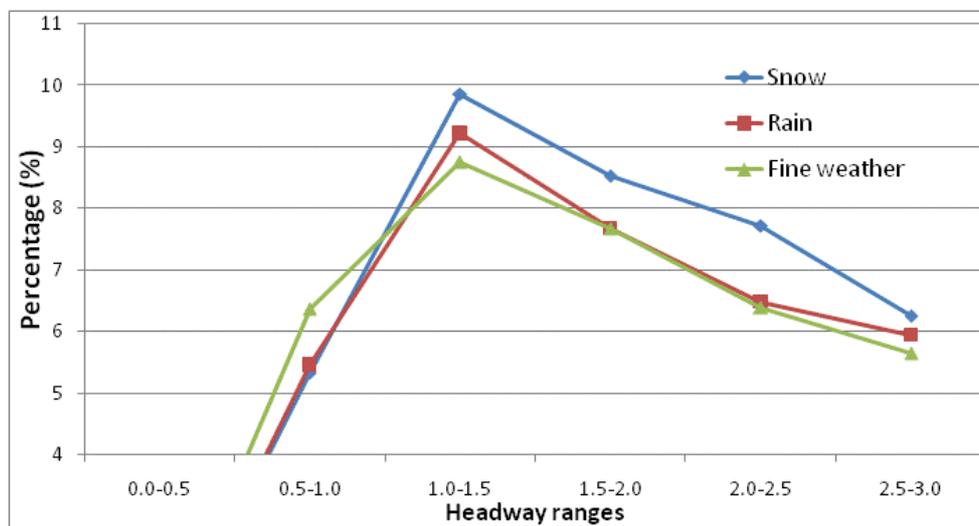


Figure 1.7 – Distribution des temps inter-véhiculaires pour un régime de débit de 500-600 veh/h. Suisse, site 226, voie 8, Projet INTRO [78].

Ces résultats ont été corroborés par Hogema [68] et Perrin *et al.* [117] et les auteurs précisent que les conducteurs augmentent leurs distances de sécurité à cause d'une certaine perception du risque (adhérence, performances des véhicules). D'autre part, un travail en simulation du trafic a indiqué que l'accélération et la décélération des véhicules étaient négativement affectées par la présence de précipitations [133]. La visibilité va jouer un grand rôle dans cette perception. Le brouillard peut être considéré comme un type de précipitation très influent mais difficile à appréhender et analyser. En Arabie-Saoudite, une étude expérimentale a visé à analyser les comportements des conducteurs face au brouillard sur une autoroute à deux voies sans limitation de vitesse, près de Al-Baha [2]. Il apparaît qu'en présence de brouillard, la vitesse diminue et sa variabilité augmente. Les conducteurs ne changent leur vitesse qu'à partir d'une visibilité inférieure à 50 mètres. Un système

d'alerte a été mis en place, qui entraîne une plus grande variabilité des vitesses des véhicules. Les conducteurs laissant habituellement un TIV inférieur à 2 secondes doublent leur TIV habituel en présence de brouillard. Le brouillard a encore été l'objet d'autres études aussi bien sur des sites expérimentaux que grâce à des simulateurs de conduite [18, 20, 131, 134, 145]. Les résultats des études sur l'impact du brouillard sont loin d'être unanimes mais les progrès dans le développement des simulateurs de conduite et la multiplication des expérimentations devraient permettre, dans les années à venir, de mieux caractériser les réactions des usagers face à ce phénomène complexe. Face à des précipitations de tout type (pluie, neige, brouillard), il semblerait donc, malgré le peu d'études existantes, que les conducteurs réduisent leurs vitesses et augmentent leurs temps inter-vehiculaires. Néanmoins, nous constatons qu'à ce niveau microscopique d'analyse, où les comportements des conducteurs doivent être scrutés individuellement, un nombre trop limité d'études ne permet pas d'effectuer une synthèse des effets météorologiques sur le comportement des conducteurs. Les raisons de ces lacunes peuvent être diverses. La plus importante à nos yeux réside dans la granularité même des données de trafic (par exemple par pas de temps de 6 minutes), non compatible avec des analyses microscopiques. En effet, ces données agrégées ne permettent pas d'atteindre le niveau de détail requis pour les analyses relatives aux temps inter-vehiculaires, distances inter-vehiculaires ou vitesses individuelles. Ces lacunes nous ont entraîné à rechercher des données individuelles pour nos propres études, comme nous le verrons par la suite. Ainsi, après avoir analysé les comportements microscopiques grâce aux données individuelles, il est ensuite possible de voir leur répercussion macroscopique. C'est à ce niveau d'analyse que la plupart des travaux antérieurs ont été conduits, leur synthèse faisant l'objet de la section suivante.

1.5 Impact météorologique sur la qualité de l'écoulement

1.5.1 Effets sur la vitesse

Comme nous l'avons rappelé dans l'introduction, les précipitations telles que la pluie, la neige, le brouillard, entraînent une dégradation de l'état de la chaussée, des performances des véhicules (perte d'adhérence), et de la visibilité. La concaténation de ces trois facteurs définit un sur-risque d'accident bien caractérisé dans la littérature liée au trafic [98], et qui motive dès lors les études sur ce thème. Les premiers travaux sur les liens entre la météorologie et les grandes variables macroscopiques ont été initiés dès les années 50 [136], avant de connaître un renouveau dans les années 70 [75]. L'interprétation des résultats peut poser une difficulté résidant dans la grande variabilité des données trafic et météorologiques. D'une part, les études peuvent concerner des sections urbaines, périurbaines ou autoroutières aux conditions et topographies variées. D'autre part, les données météorologiques n'ont pas toujours la même précision et certaines ne reflètent pas forcément les conditions vécues par les usagers de la section au moment du recueil. Ainsi, un nombre relativement important d'études nord-américaines exploite, à défaut d'autres

sources, les données météorologiques fournies par les stations des grands aéroports les plus proches. La comparaison des résultats ou l'éventuelle recherche d'un consensus dans la quantification des effets doit s'effectuer avec la plus grande prudence au vu de ces disparités. Les effets d'une météorologie dégradée sur la vitesse du flot ont été plus largement étudiés que les comportements individuels des conducteurs et leurs interactions. Les phénomènes météorologiques étudiés sont principalement la pluie, la neige, le vent et le brouillard. Selon le manuel américain sur l'exploitation des autoroutes (Highway Capacity Manual), une baisse des vitesses moyennes est systématiquement observée sur les voies rapides, s'étalant de 3 % pour une pluie fine à 13 % pour des conditions neigeuses [67]. Des conditions plus intenses de pluie ou de neige forte intensifient le phénomène, mais avec une plus grande variabilité. Ainsi, des réductions moyennes de la vitesse du flot de 3 à 16 % sont notées en cas de pluie forte tandis que ces baisses se situent entre 5 et 40 % en cas de neige forte. Selon d'autres études nord-américaines, la vitesse du flot baisse de 2 à 13 % en cas de pluie fine, 6 à 17 % en cas de pluie intense. Ces réductions peuvent atteindre 64 % en cas d'épisode neigeux [71,138]. Les conclusions des études de Ibrahim et Hall [72] et de May [120] sont en accord avec l'ensemble des résultats nord-américains sur les sections inter-urbaines. Au Japon, une étude plus précise fait état d'une réduction de 4.5 % de la vitesse moyenne pour une intensité de pluie de 1mm/h, cette réduction pouvant atteindre 8.2 % en cas de forte pluie [26].

En Europe, les études empiriques du projet INTRO ont mis en lumière le fait que la vitesse était le principal paramètre affecté par la météorologie [78]. Les données suisses et polonaises ont été respectivement collectées sur une autoroute interurbaine à 3 ou 4 voies et une voie rapide autour de Varsovie (2 voies). Les résultats sont similaires pour les deux sites, qui soulignent une vitesse moyenne supérieure lors de conditions météorologiques clémentes. La figure 1.8 présente ainsi les réductions associées pour le site suisse :

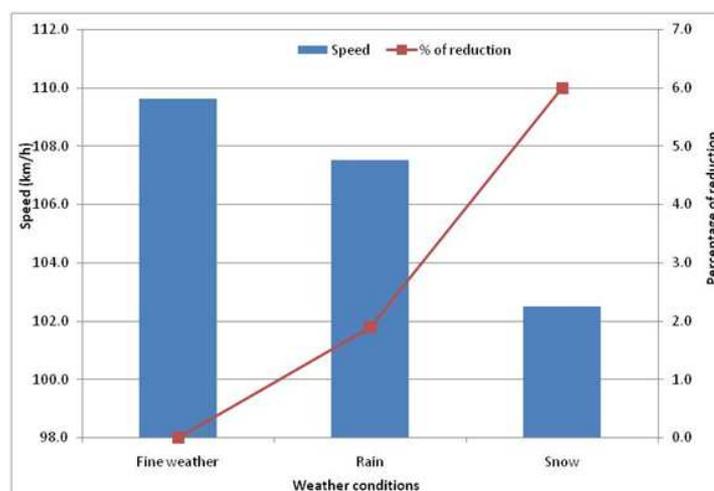


Figure 1.8 – Réductions des vitesses moyennes pour la voie 1, site 149, données suisses. Projet INTRO [78].

A partir d'un certain nombre d'études, il semble bien que ce soit l'état de la

chaussée, ou plutôt sa perception par les conducteurs, qui représente un facteur critique découlant directement des précipitations. Brilon et Ponzlet [17] ont étudié la fluctuation de la vitesse moyenne sur autoroute en Allemagne. Une chaussée mouillée entraîne une réduction de 9,5 km/h sur autoroute à deux voies et d'environ 12 km/h sur l'autoroute à trois voies. Ce résultat est confirmé par l'étude de Kyte *et al.* [89], où la vitesse baisse de 9,5 km/h quand la chaussée est mouillée. Toutefois, un consensus sur ces chiffres est encore loin de se dégager, Galin [50] chiffrant par exemple cette réduction à 7 km/h dans le cas australien tandis que Lamm *et al.* [90] ne soulignent pas d'incidence de la pluie sur la vitesse. Il est intéressant de remarquer que l'impact des précipitations sur les vitesses a également fait l'objet d'études en milieu urbain. Dans ce contexte, certaines recherches se sont focalisées sur la manière d'adapter le phasage de feux en cas de conditions météorologiques dégradées [100, 117].

Associé aux précipitations, le vent altère de surcroît la visibilité et peut amplifier la baisse des vitesses [47, 89, 96]. Pour un vent violent (vitesse supérieure à 24 km/h selon [89]), la réduction de la vitesse moyenne pourrait atteindre 13 km/h [47]. La présence d'un vent fort, de par l'instabilité qu'elle crée dans la conduite, représente donc un facteur à prendre en considération dans les études, pouvant introduire de forts biais dans les résultats. Néanmoins, il reste à obtenir un consensus sur le seuil à partir duquel la vitesse du vent devient significative. Ainsi, Liang *et al.* [96] fixent pour leur part le seuil significatif à 40 km/h, chaque km/h supplémentaire au-delà de ce seuil entraîne une baisse de la vitesse des véhicules de 1,1 km/h.

1.5.2 Effets sur la capacité

Dès les années 1970, les travaux pionniers de Jones *et al.* [75] mettaient en exergue une influence de la pluie sur la capacité d'une autoroute à trois voies. Cette baisse de la capacité se situait entre 14 et 19 %. Nous rappelons ici que la capacité représente le nombre maximum de véhicules pouvant s'écouler par unité de temps en un point donné de l'infrastructure. L'estimation de ce débit maximum est en soi un problème intéressant qui va constituer une des raisons de la grande variabilité des résultats, au même titre que l'hétérogénéité des sections et des données trafic et météorologiques. Si une grande variabilité est présente dans la quantification de l'impact des précipitations sur la capacité, les différentes études ne laissent planer aucun doute sur la significativité de ce dernier. Après Jones [75], plusieurs études permettent de chiffrer les baisses de capacité pour les axes inter-urbains d'Amérique du Nord. Cette réduction se situe :

- de 4 à 30 % en cas de pluie légère à forte [24, 57, 72, 130],
- jusqu'à 48 % en cas de neige.

Une autre recherche de Ries [125] a évalué l'effet de l'intensité des précipitations sur la capacité. Pour chaque 0,01 pouce/h (0,254 mm/h) supplémentaire de pluie, la capacité se réduit seulement de 0,6 % et chaque 0,01 pouce/h (0,254 mm/h) supplémentaire (en eau équivalente) de neige fait diminuer la capacité de 2,8 %. Quant à l'état de la chaussée, la recherche de Brilon et Ponzlet en Allemagne démontre que la capacité baisse de 350 véhicules par heure (vph) sur autoroute à deux voies et de plus de 500 vph sur autoroute à trois voies en cas de chaussée

mouillée [17].

Similairement aux précédentes études, la disparité des résultats peut être liée à des différences régionales. Ainsi, au Japon, à partir d'un volume de données conséquent et en étudiant 5 sections congestionnées du réseau MEX (Metropolitan Expressway) de Tokyo, Chung *et al.* [26] caractérisent avec précision les baisses de capacités sur cette autoroute urbaine. Pour une intensité de pluie de 1mm/h, la baisse résultante est de 4-7 % tandis que pour une pluie forte (20 mm/h), cette réduction peut atteindre 14 %. Remarquons qu'une pluie forte n'entraîne pas des baisses excessives : les japonais, habitués au phénomène de pluie abondante, n'ont pas la même sensibilité face à de fortes précipitations que d'autres populations. La figure 1.9 montre, pour les cinq sites de l'étude, les différentes baisses de capacité en fonction de l'intensité de la pluie.

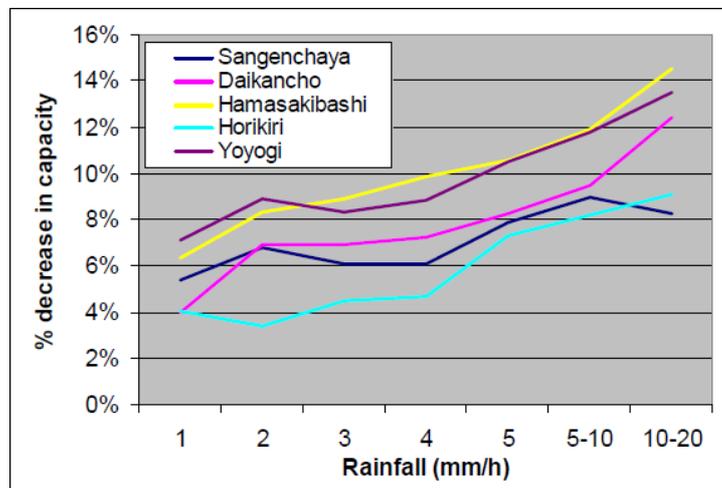


Figure 1.9 – Réductions des capacités sur le réseau MEX de Tokyo en fonction de l'intensité de la pluie [26].

1.5.3 Effets sur le diagramme fondamental

Lorsque la vitesse du flot et les débits ou la capacité sont étudiés en parallèle, il est tout à fait naturel d'essayer de caractériser l'impact des conditions météorologiques sur les différentes formes du diagramme fondamental. Aux Etats-Unis, Maze *et al.* [101] ont tiré parti des données trafic fournies par le système de gestion de trafic des villes de Minneapolis et Saint Paul (*Twin Cities*) pour étudier les baisses de capacité et de vitesse lors de conditions météorologiques dégradées. Le tableau 1.3 reproduit ainsi les réductions des différents paramètres : Tandis que l'impact de la vitesse du vent et l'effet des températures sont négligeables (non reportés dans le tableau), il apparaît que la pluie, la neige, et la visibilité ont des effets significatifs, en accord avec les résultats précédemment exposés, plus ou moins importants selon l'intensité des phénomènes. Les auteurs poursuivent ensuite en établissant l'évolution de la relation fondamentale débit/taux d'occupation dans sa partie fluide (régime non congestionné). Le taux d'occupation remplace ici la concentration et la figure

Type d'évènement	Réduction de la capacité	Réduction de la vitesse
Pluie	2 à 14 %	2 à 6 %
Neige	4 à 22 %	4 à 13 %
Visibilité	10 à 12 %	7 à 12 %

TAB. 1.3 – Réductions de la capacité et la vitesse libre en cas de précipitation. Minneapolis/St Paul, USA [101].

1.10 montre bien une baisse de la pente (proportionnelle à la vitesse libre) de la droite débit/taux d'occupation, qui s'accroît en fonction de la sévérité du phénomène météorologique pris en compte.

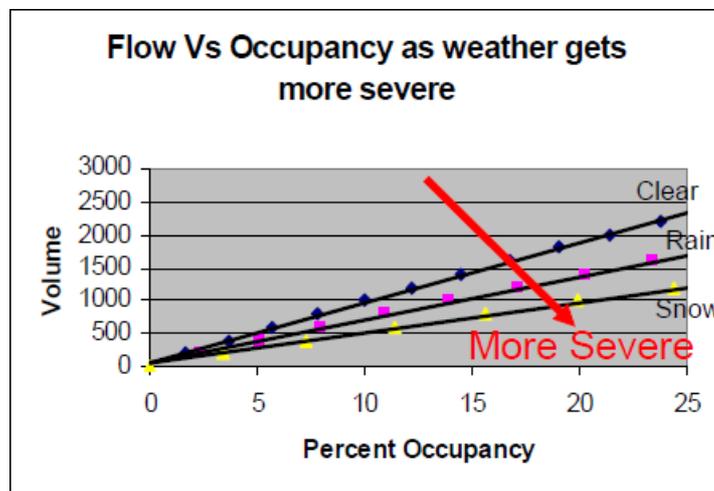


Figure 1.10 – Modification de la relation débit-taux d'occupation en fonction de l'intensité du phénomène météorologique [101].

Comme la plupart des études introduisant le diagramme fondamental, un manque de données en congestion empêche les auteurs de mettre en évidence les effets météorologiques sur le trafic pour l'ensemble des conditions de circulation. C'est aussi le cas de Hall et Barrow [57] qui présentent des résultats similaires pour une étude réalisée au Canada avec des données collectées en 1986. Une forme exponentielle est sélectionnée pour la relation débit-taux d'occupation mais les auteurs se limitent à la partie fluide de la relation fondamentale avec des données par temps de pluie et de neige.

Les baisses respectives de la vitesse libre et de la capacité se répercutent directement sur la relation fondamentale vitesse-débit. Nous montrons ici deux graphiques qui reproduisent les nuages de points vitesse-densité. Ces figures (figure 1.11), tirées des articles de Chung *et al.* [26] et du projet INTRO [78], montrent clairement que les réductions de la vitesse libre et de la capacité vont entraîner le nuage de points par temps pluvieux à se situer globalement sous celui correspondant à une situation normale (temps sec).

L'incorporation des effets météorologiques dans le diagramme fondamental semble donc être la suite logique de l'ensemble des résultats présentés. Pourtant peu d'études

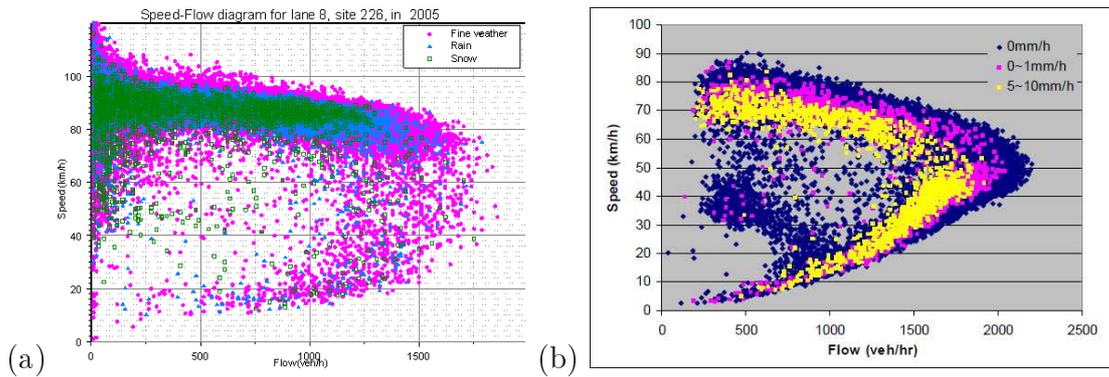


Figure 1.11 – Relation vitesse/débit pour différentes intensités de précipitation. (a) Projet INTRO [78] et (b) données japonaises du réseau MEX [26].

ont été consacré au calibrage des modèles de trafic en fonction des conditions météorologiques. Parallèlement à nos travaux, Rakha *et al.* [124] ont poursuivi cet objectif, en reprenant notamment les données et les travaux de Maze *et al.* [101]. Ce travail s'est inscrit dans le cadre du Road Weather Program de l'administration américaine des autoroutes (FHWA) [71]. En utilisant des données trafic de type boucle (vitesse, débit, taux d'occupation) provenant des villes de Baltimore, Minneapolis/St. Paul et Seattle, associées aux données sur les précipitations et la visibilité, l'étude de Rakha *et al.* s'est placée dans une optique de calibrage et d'estimation des principaux paramètres des modèles de trafic : vitesse libre, capacité, densité maximale, vitesse à capacité (ce dernier est un paramètre que l'on trouve dans le modèle de Van Aerde [139]). Les résultats des études sont cohérents avec ceux de la littérature et les auteurs proposent des premières pistes pour l'ajustement des paramètres des modèles de trafic en fonction du taux de précipitation. En revanche, cette étude peut parfois souffrir d'un manque de précision pour la donnée météorologique, qui a été recueillie à partir de données atmosphériques aéroportuaires.

1.5.4 Effets sur les temps de parcours

Le temps de parcours constitue un indicateur revêtant une importance primordiale, aussi bien pour l'utilisateur que pour le gestionnaire. Pour le gestionnaire, il s'agit de fournir *a priori* ou en temps réel l'information la plus fiable sur les conditions de trajet tandis que l'utilisateur pourrait, grâce à une information précise sur les temps de parcours, mieux prévoir les modalités de celui-ci (heures de départ, changement de mode, etc.). Pourtant, si la pertinence de l'ajustement des estimations de temps de parcours en fonction des conditions météorologiques apparaît évidente, peu de systèmes de gestion incorporent cette source d'incertitude dans l'information transmise aux usagers [123]. Par rapport à l'ensemble des travaux précédemment cités, il apparaît clairement que les effets des précipitations aux niveaux micro- et macroscopiques se reflètent directement sur les valeurs de temps de parcours. De rares travaux ont cependant abordé frontalement cette question. Au Japon, Chung *et al.* [25] soulignent que la hausse du temps de parcours est négligeable pour des

faibles densités de véhicules tandis que l'effet est significatif pour des régimes denses. Goodwin *et al.* [54] concluent pour leur part sur une hausse de 12 % des temps de parcours en heures creuses. En cas de chaussée glissante ou de neige, ce chiffre augmente de respectivement 5 et 23 %. En cas de conditions de tempêtes hivernales (neige forte), cette augmentation peut atteindre les 50 % . Enfin, une dernière étude quantifie à 24 % la hausse possible des temps de parcours lors de précipitations [88].

1.6 Conclusion

L'analyse des effets de la météorologie sur le trafic représente un sujet relativement ancien mais incomplètement étudié. Dès les années 50, Tanner [136] avait recensé différents volumes de trafic sur 21 points du réseau britannique avant d'établir un lien entre de mauvaises conditions météorologiques et des baisses de volume. Par la suite, l'apparition des boucles électromagnétiques a permis un recueil systématique des données trafic et ouvert la voie à de nouvelles études sur le trafic routier. Toute étude relative à l'impact météorologique sur le trafic automobile est motivée par l'un des domaines suivants :

- Impact des mauvaises conditions météorologiques sur la sécurité,
- Impact sur la demande (volumes de trafic ou modalités de déplacement),
- Effets sur la vitesse, la capacité, ou d'autres variables caractéristiques.

Après avoir rappelé, dans l'introduction de ce manuscrit, quelques résultats majeurs liés à la sécurité, une synthèse des travaux concernant les modifications dans la structure de la demande et les volumes de déplacement a mis en exergue quelques tendances comportementales des usagers face à une météorologie dégradée. Ainsi, la flexibilité du déplacement joue un grand rôle et les déplacements les plus susceptibles d'être annulés seront ceux liés aux loisirs. Sauf événement extrême, les déplacements pendulaires, inhérents aux pays développés, ne sont pas touchés par les phénomènes d'annulation, l'usager préférant anticiper son déplacement pour arriver en temps et en heure sur son lieu de travail. C'est donc en toute logique que les baisses de volumes liées à la météorologie sont souvent plus importantes le week-end (déplacements liés aux loisirs) qu'en semaine. Ces baisses de volumes sont relativement faibles et toutes les études ne s'accordent pas sur leur importance et leur significativité. De plus, tous les usagers ne sont pas égaux face aux phénomènes météorologiques. Certaines catégories d'usagers, comme les routiers par exemple, plus contraints que d'autres mais aussi plus expérimentés, seront beaucoup moins influencés par des considérations météorologiques. A échelle plus réduite, les disparités comportementales entre nationalités, plus généralement les différences régionales, entrent en jeu et complexifient les analyses. Si il est raisonnable de penser qu'un épisode pluvieux modifierait dans certains cas structurellement la demande, par exemple en plein été dans le sud de l'Espagne, il semble également logique que le même événement passe inaperçu ailleurs (ex : ouest de l'Angleterre).

La prépondérance des différences régionales justifie en partie la multiplication et la similarité de nombreux travaux nord-américains sur les grandes variables caractéristiques du trafic (capacité, vitesse libre, etc.). A partir de données trafic agrégées et d'une information météorologique le plus souvent globale (aéroports),

l'influence des conditions météorologiques dégradées (pluie, neige le plus souvent) a été mise en valeur *via* un certain nombre d'études empiriques. Les différents travaux s'accordent à dire que la vitesse du flot et la capacité sont réduites en cas de mauvais temps, le pourcentage de réduction étant fonction de l'intensité du phénomène et de facteurs aggravants (visibilité, force du vent, voire températures). Néanmoins, aucune méthodologie claire ni aucun consensus ne ressort de ces études. La variété des sections étudiées, la précision parfois douteuse des données météorologiques et surtout le manque de données, laissent souvent le lecteur dans l'expectative. En Europe, les différentes études sont insuffisantes et il y a un réel besoin pour les gestionnaires d'obtenir des quantifications pertinentes des effets météorologiques sur les vitesses du flot et les capacités des différentes sections. Du bilan bibliographique dressé dans ce chapitre se dégage également, manifestement, une carence importante : un manque d'études au niveau microscopique et une absence de lien entre les niveaux microscopiques du comportement du conducteur et le niveau macroscopique de l'écoulement. En comparaison avec la bibliographie relative aux effets sur les vitesses, les débits, la capacité, il existe un nombre infime de travaux portant sur les comportements individuels des conducteurs. Les effets de la pluie sur les distributions des vitesses individuelles, des temps et distances inter-véhiculaires ont été très peu abordés, à quelques exceptions près. Cette lacune peut en partie être expliquée par la nature agrégée des données mises à la disposition des chercheurs. Ainsi, les liens entre temps inter-véhiculaires et débits, distances inter-véhiculaires et concentration, ne sont pas exploités. C'est donc ce manque que nous tenterons, du moins partiellement, de combler, en exposant dans le chapitre suivant nos propres études empiriques, lesquelles nous paraissent s'appuyer sur une méthodologie plus rigoureuse et plus systématique.

Méthodologie d'analyse et quantification des effets météorologiques sur le trafic

Sommaire

2.1	Introduction	34
2.2	Etudes préliminaires	34
2.2.1	Etude 1 : analyse de données individuelles. Cas des données ASF	35
2.2.2	Etude 2 : analyse de données agrégées. Cas des données APRR	38
2.2.3	Conclusions	40
2.3	Démarche méthodologique	41
2.3.1	Problématique	41
2.3.2	Méthodologie multi-niveaux	42
2.3.3	Entreposage des données et solutions logicielles	46
2.4	Application à des données opérationnelles	47
2.4.1	Description des données	47
2.4.2	Prétraitement et échantillonnage	50
2.4.3	Niveau microscopique	52
2.4.4	Niveau mésoscopique : analyse des pelotons	59
2.4.5	Niveau macroscopique	62
2.5	Conclusions	64

2.1 Introduction

L'état de l'art présenté dans le chapitre précédent a fait apparaître aussi bien la richesse que la complexité des analyses des effets météorologiques sur le trafic. Le peu d'études en Europe, l'absence de méthodologie bien définie, ainsi que d'évidentes lacunes à certains niveaux d'analyse ont laissé entrevoir des nouvelles pistes d'études pour la quantification de l'impact météorologique sur le trafic. Parmi les résultats originaux qui seront présentés dans ce chapitre, des études préliminaires montreront, dans un premier temps, les effets sous-jacents des précipitations sur les répartitions des véhicules par voie ainsi que l'influence de la composition du trafic sur les résultats (section 2.2). Ces résultats viseront à introduire un cadre méthodologique qui servira de plan d'analyse aux futures études empiriques (section 2.3). Il s'agit d'une démarche dans laquelle tous les facteurs exogènes pouvant influencer ou biaiser les résultats, comme les variations de volume ou les jours de la semaine, sont contrôlés. En isolant ainsi les effets météorologiques sur la circulation, la quantification de son impact devient plus rigoureuse. Notre méthodologie s'appuie sur des données boucles individuelles : à chaque passage d'un véhicule lui correspond un enregistrement dans la base de données. Partant de cette granularité fine des données, nous proposons une approche multi-niveaux, permettant de traiter le problème aux échelles suivantes :

- microscopique : comportements individuels des conducteurs,
- mésoscopique : groupes de véhicules, pelotons,
- macroscopique : flots de véhicules.

Cette méthodologie a ensuite été appliquée sur des données opérationnelles et les résultats confirment des effets significatifs de la pluie pour ces différents niveaux d'analyse (section 2.4). Nous présenterons des approches originales, notamment aux niveaux micro- et mésoscopiques, qui aident à mieux comprendre l'influence des phénomènes météorologiques sur le trafic et à préparer leur intégration dans des formalismes plus théoriques de modélisation du trafic.

2.2 Etudes préliminaires pour l'élaboration d'une méthodologie

Au sein de cette section, nous commençons par illustrer la nécessité d'un plan d'analyse systématique à travers deux études de cas. La première concerne des données individuelles autoroutières. Elle s'attache à introduire quelques principes pour la sélection des données et à clarifier les différences comportementales entre les classes de véhicule (poids lourds et véhicules légers) face aux aléas météorologiques. La deuxième étude est fondée sur des données agrégées de l'autoroute A6 Paris-Lyon qui se caractérisent par une certaine variabilité temporelle de la composition du trafic. En exploitant ce dernier aspect, cette deuxième étude met l'accent sur l'importance de sa prise en compte lors des études liées à la météorologie.

2.2.1 Etude 1 : analyse de données individuelles. Cas des données ASF

Les données ont été recueillies sur le réseau des Autoroutes du Sud de la France (ASF), et plus spécifiquement sur l'autoroute A9 (2*3 voies) entre les villes de Montpellier et Avignon. Les données trafic sont fournies par des stations HESTIA (www.ecm-france.com), tandis qu'une station Météo-France de Lunel a permis de pré-sélectionner des jours potentiellement comparables (figure 2.1). Les données



Figure 2.1 – Site d'études 1 : autoroute A9, France

trafic sont de nature individuelle, fournissant donc à chaque passage du véhicule les informations suivantes :

- Horodate de passage du véhicule,
- Longueur et nombre d'essieux,
- Catégorie du véhicule,
- Type de voie (voie lente, voie mediane, voie rapide),
- Temps et distances inter-véhiculaires,
- Vitesses.

Les données météorologiques sont quant à elles fournies par une station météo-routière Boshung située près de la section (à moins de 200 mètres). Toutes les 4 à 7 minutes, les informations suivantes sont recueillies :

- Localisation,
- Horodate,
- Températures de l'air et de la chaussée,
- Vitesse du vent,
- Classe/intensité de la précipitation.

La variable "température" a été transformée en variable qualitative selon les catégories suivantes (la même approche a ensuite été effectuée avec les variables "température de la chaussée" et "vitesse du vent") :

- température basse si la température de l'air est $< 10^{\circ}C$,
- température moyenne si la température est comprise entre 10 et $30^{\circ}C$,
- température forte si la température de l'air $> 30^{\circ}C$.

Pour cette étude, les données ont été pré-sélectionnées par rapport aux bulletins Météo-France de la station de Lunel (figure 2.1). Deux week-ends consécutifs ont été choisis au début de l'année 2006 : le week-end du 6 et 7 Janvier et le week-end du 14 et 15. Ce choix se justifie par le fait qu'il a plu pendant le premier week-end tandis que le second week-end n'a pas connu de chutes de précipitations. Pour comparer les deux jeux de données, deux périodes similaires avec un nombre comparable de véhicules ont été sélectionnées, comme le montre le tableau 2.1

Cond. Météo. et trafic	Date et Heure	Voie lente		Voie mediane		Voie rapide		Nb. total de veh.
		# veh	% vl	# veh	% vl	# veh	% vl	
Pluie, trafic fluide	Samedi 07/01/2006 de 13h53 à 15h12	1525	63%	1851	99%	512	100%	3888
Sec, trafic fluide	Samedi 14/01/2006 de 13h53 à 15h12	1571	56%	1821	97%	482	100%	3874

TAB. 2.1 – Description des données et composition du trafic.

Ce tableau présente, par ailleurs, des conditions identiques pour les deux échantillons : seul le paramètre météorologique différencie les deux jeux de données. En ce qui concerne les conditions météorologiques, il peut être ajouté que d'autres facteurs potentiellement influents n'étaient pas présents. Il a été vérifié qu'il a plu sur la section le 7 Janvier 2006 entre 13h53 et 15h12 et que le temps était complètement sec sur cette même section le samedi suivant. Les autres paramètres météorologiques étaient, d'après les capteurs météorologiques, tout à fait identiques : un vent léger inférieur à 16 km/h et des températures basses inférieures à $10^{\circ}C$. De plus, il n'y avait, malgré la période de l'année, aucun risque de gel avec des températures toujours positives. Ainsi, la pré-sélection des données comporte deux objectifs majeurs :

1. Neutraliser les impacts potentiels liés à la variabilité inter-journalière du trafic,
2. Isoler la variable météorologique pour mieux caractériser ses effets.

Une telle sélection des données soulève d'ores et déjà la difficulté à laquelle sont confrontées les études statistiques visant à analyser les effets météorologiques : la faible taille des échantillons de données. Ainsi, sélectionner des sous-périodes adéquates, séparer selon le type de voie ou la catégorie du véhicule réduit inexorablement le volume de données initial et peut nuire à la pertinence des résultats.

A partir de la pré-sélection des données, il a ensuite été possible d'extraire de l'information à propos de la répartition des véhicules par voie. La figure 2.2 décrit la distribution, pour la période considérée, des véhicules légers et des poids lourds sur les trois voies.

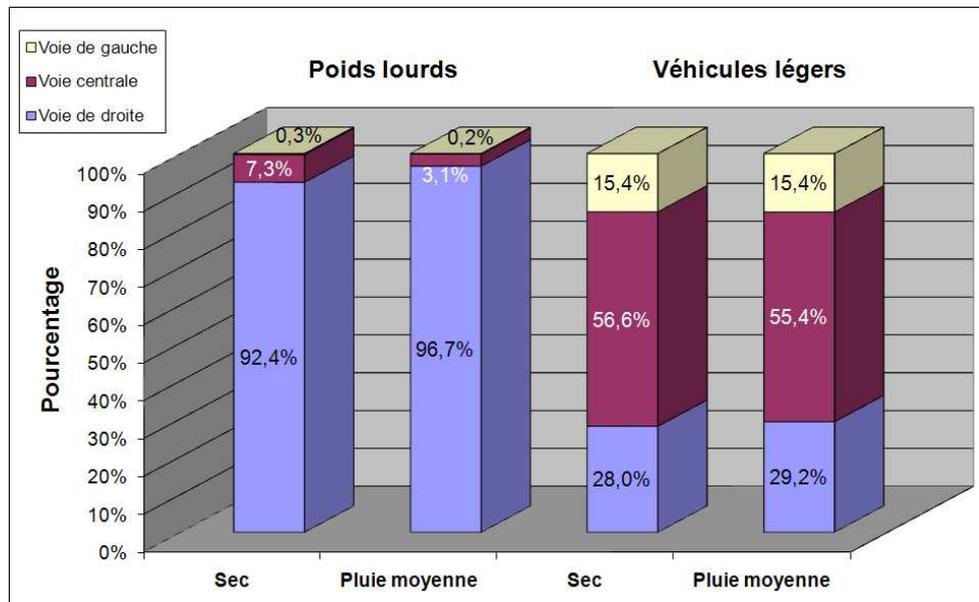


Figure 2.2 – Répartition des véhicules par voie : autoroute A9, France.

Cette figure indique que l'intensité de la pluie relevée ce jour-là n'a pas d'effet significatif sur la répartition des véhicules sur les différentes voies. Environ 30 % se répartissent sur la voie de droite, 15 % sur la voie de gauche alors que plus de la moitié des véhicules circule sur la voie médiane. En s'intéressant plus particulièrement à la catégorie des poids lourds, on observe qu'une intensité de pluie moyenne a une influence sur la répartition par voie. Premièrement, il faut rappeler que, à cause de la législation en vigueur, le trafic des poids lourds sur la voie de gauche (rapide) est quasiment inexistant. Concernant les deux autres voies, une part significative de poids lourds (4,2 %) circulant sur la voie médiane lors de conditions météorologiques normales se reporte sur la voie de droite en temps de pluie. Cet aspect de la répartition des catégories de véhicules pourrait s'expliquer par le fait que les poids lourds sont moins sensibles au manque de visibilité (peu de projections venant des autres véhicules par exemple), et leurs conducteurs, souvent expérimentés, plus au fait de la dangerosité d'une conduite agressive lors d'une météorologie dégradée. La conduite des poids lourds s'adapte donc à la nouvelle situation par une limitation des dépassements et une conduite plus attentive.

Cette attitude plus expérimentée pourrait se traduire par des temps inter-véhiculaires plus sécurisants. Même si le volume de données disponible ne permet pas de conclure en toute rigueur, il semble bien que les poids lourds gardent plus de distances entre eux ou avec tout véhicule qui les précède. Le graphique de gauche de la figure 2.3 confirme ce comportement, en décrivant le temps inter-véhiculaire moyen enregistré en agrégant les données par pas de temps de six minutes.

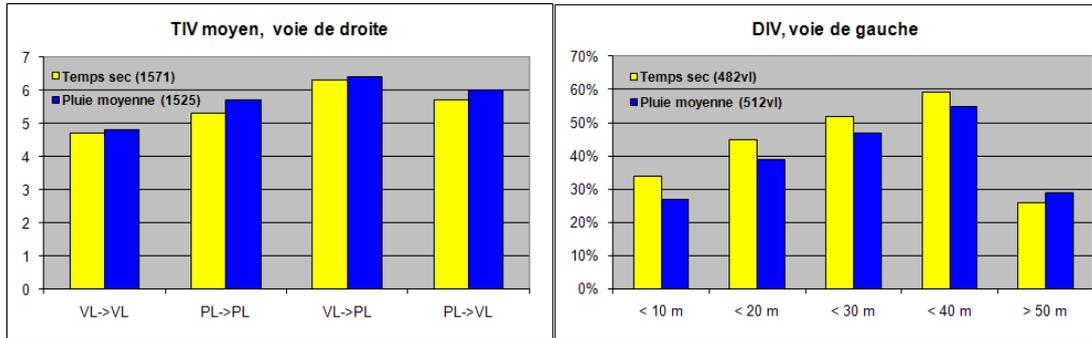


Figure 2.3 – TIV moyen (en secondes) selon la configuration suiveur/suivant (à gauche).
Distribution des DIV sur la voie rapide (à droite) : autoroute A9, France

Ainsi, le temps inter-véhiculaire entre deux poids lourds sera moyennement plus grand quelles que soient les conditions météorologiques. De plus, le temps inter-véhiculaire sera également plus grand si un poids lourd suit un véhicule léger que dans le cas inverse. Par rapport à l'influence d'une pluie moyenne sur les résultats, il apparaît que le temps inter-véhiculaire moyen augmente dans tous les cas. La deuxième partie de la figure met quant à elle en exergue la répartition des distances inter-véhiculaires sur la voie de gauche, qui ne comporte que des véhicules légers (VL). En cas de mauvaises conditions météorologiques, la proportion des véhicules légers ayant de courtes distances inter-véhiculaires (< 50m) diminue, avec un report notable sur des distances plus grandes (> 50m). Néanmoins, il faut pondérer ces interprétations par le nombre modeste de résultats (pas plus de 500 observations sur la voie rapide).

Cette première étude laisse donc entrevoir que la composition du trafic doit être bien prise en compte dans les analyses. En ce qui concerne la répartition des véhicules par voie, des études supplémentaires sont nécessaires pour déterminer si il y a un effet significatif, qui atteindrait plus directement les poids lourds.

2.2.2 Etude 2 : analyse de données agrégées. Cas des données APRR

L'objet de cette étude est de mettre en évidence les effets de la composition du trafic sur les résultats des études empiriques qui justifieront certains aspects de la méthodologie introduite dans la section suivante. Le site étudié est un tronçon de l'autoroute A6 géré par les Autoroutes Paris-Rhin-Rhône (APRR) dans le sens Paris-Lyon (2 fois 3 voies), représenté sur la figure 2.4.

Les données ont été enregistrées entre le 15 avril 2005 et le 28 avril 2005, sur la base d'agrégations temporelles de six minutes. Les capteurs trafic et météorologiques fournissent toutes les six minutes les variables suivantes :

- Vitesse du flot (km/h),
- Débit (veh/h),
- Taux d'occupation (%).

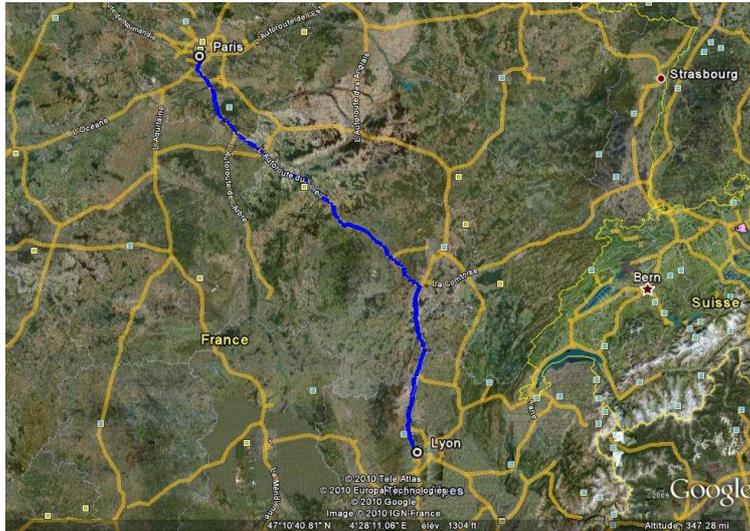


Figure 2.4 – Tracé de l'autoroute A6 Paris-Lyon.

– Etat de la chaussée (par rapport à l'humidité mesurée en surface).

Premièrement, il est apparu que les données APRR n'étaient pas assez exhaustives pour permettre une analyse fine, l'absence de données en régime congestionné se faisant particulièrement sentir. Un examen de la chronique de la proportion des véhicules légers par pas de temps de 6 minutes sur toute la période d'étude (15 au 28 Avril 2006) montre toutefois une variabilité intéressante de la composition du trafic sur cette section autoroutière (figure 2.5).

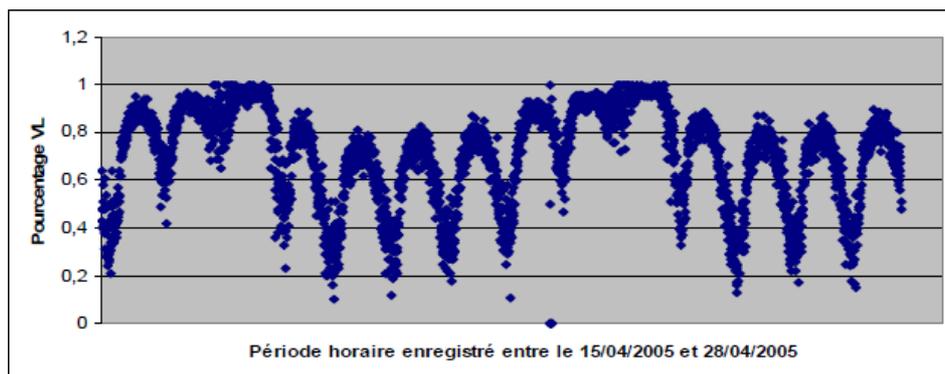


Figure 2.5 – Chronique de la fraction de véhicules légers dans le flot sur les 15 jours de données disponibles. Données APRR.

Nous avons ainsi segmenté la composition du trafic en différentes classes de composition du trafic, construites selon le pourcentage de véhicules légers :

1. $20 \% < \% vl < 40 \%$,
2. $40 \% < \% vl < 60 \%$,

3. $60 \% < \% \text{ vl} < 80 \%$,
4. $80 \% < \% \text{ vl} < 100\%$.

Cette classification rend notamment possible de représenter l'évolution de la vitesse libre en fonction du pourcentage de véhicules légers (VL) dans le flot. L'évolution de la vitesse libre en fonction de la composition du trafic et de la météorologie est décrite par la figure 2.6, qui présente également les intervalles de confiance associés.

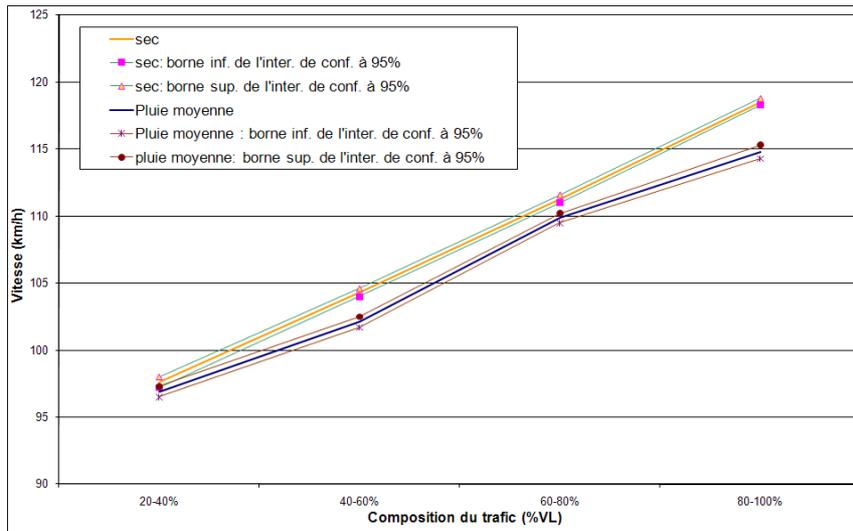


Figure 2.6 – Evolution de la vitesse libre en fonction du pourcentage de véhicules légers par modalité de précipitation. Données APRR.

Cette figure est utile en ce sens qu'elle rend saillant, au premier coup d'oeil, le biais que la composition du trafic peut introduire dans les études. Mais quelle que soit la classe de composition de trafic, il apparaît que la vitesse libre diminue en passant d'un temps sec à pluvieux. Cette diminution est manifeste pour les classes qui ont un pourcentage de VL supérieur à 40 % du fait que les intervalles de confiance ne se chevauchent pas. Des réductions moyennes de respectivement 2.1, 1.2 et 3.1 % de la vitesse libre sont soulignées pour les classes 40-60 %, 60-80 %, et 80-100 %. Pour la classe comportant le moins de véhicules légers, les intervalles de confiance s'entrecroisent et les résultats ne peuvent pas être considérés significatifs, sûrement par manque de données. Remarquons qu'en interpolant les courbes présentées des deux cotés, on retrouverait une vitesse moyenne de 125-130 km/h pour un trafic composé à 100 % de véhicules légers, ainsi qu'une vitesse moyenne de 90 km/h pour un flot composé à 100 % de poids lourds, ces deux valeurs correspondant aux limites légalement en vigueur.

2.2.3 Conclusions

Les études présentées dans cette section, volontairement nommées préliminaires, non seulement par soucis chronologiques, mais aussi en raison du nombre limité de

données qu'elles ont pu mobiliser, ont permis de dégager des premières tendances par rapport au comportement des conducteurs face au phénomène météorologique mais surtout de souligner l'influence de la composition du trafic et des classes d'utilisateurs sur les résultats. Ces disparités sont d'autant plus pertinentes qu'elles permettent de réexaminer sous un autre angle de vue certaines études présentes dans la littérature, où les précautions d'usage ne semblent pas toujours respectées. Elles justifient d'autant plus la proposition d'un cadre méthodologique qui pourrait guider les futures analyses relatives à l'influence des précipitations sur le trafic. C'est à la proposition d'une telle méthodologie, forcément soutenue par des échantillons de données plus conséquents, que les sections suivantes vont s'atteler.

2.3 Démarche méthodologique

2.3.1 Problématique

À l'aune de la synthèse bibliographique et des études préliminaires présentées jusqu'ici, un certain nombre de facteurs exogènes apparaissent qui, si ils ne sont pas pris en compte, peuvent biaiser les analyses. La sélection et la mise en correspondance des données trafic et météorologiques doivent se faire d'une manière rigoureuse pour assurer la pertinence et la généralisation des résultats obtenus. La préparation et le filtrage des données trafic constitue une étape préalable longue, parfois fastidieuse, mais inévitable de par les anomalies inhérentes aux mesures par boucles électromagnétiques, qui affectent la qualité des données. Ensuite, reste à sélectionner des dates et sous-périodes de données cohérentes pour la comparaison des résultats lors de conditions météorologiques variées. Cet ensemble de sous-sélections, c'est-à-dire de restrictions, doit se faire dans un cadre méthodologique propre, tout en veillant au respect d'une taille critique des échantillons autorisant la généralisation des résultats. En ce qui concerne le contenu des analyses, un besoin de nouvelles investigations sur les comportements des conducteurs lors de conditions dégradées se fait ressentir, particulièrement au niveau microscopique. En effet, trop peu d'études ont pu tirer avantage de la richesse des données individuelles, qui permettraient d'analyser les variations de certaines variables microscopiques en fonction de la météorologie. Cette carence s'explique avant tout par la granularité même des données trafic utilisées pour ces études, souvent agrégées par pas de temps de une ou plusieurs minutes. Or, si la pratique d'archivage se fonde sur des agrégations de données pour des raisons de place de mémoire, la donnée brute est bien individuelle et quelques gestionnaires conservent encore ces historiques de données sur certains sites tests. En commençant une analyse au niveau de description le plus détaillé possible, les données individuelles peuvent ensuite être agrégées pour observer la répercussion des résultats sur d'autres échelles d'analyse. C'est cette approche multi-niveau qui sera présentée par la suite, les résultats et difficultés soulevés dans les études préliminaires venant nourrir quelques principes méthodologiques pour les futures études empiriques.

2.3.2 Méthodologie multi-niveaux

Afin de coupler pertinemment données trafic et météorologiques, puis de les analyser en tirant parti de toutes les possibilités offertes par les données individuelles, un cadre méthodologique visant à normaliser cette démarche est proposé et synthétisé par la figure 2.7.

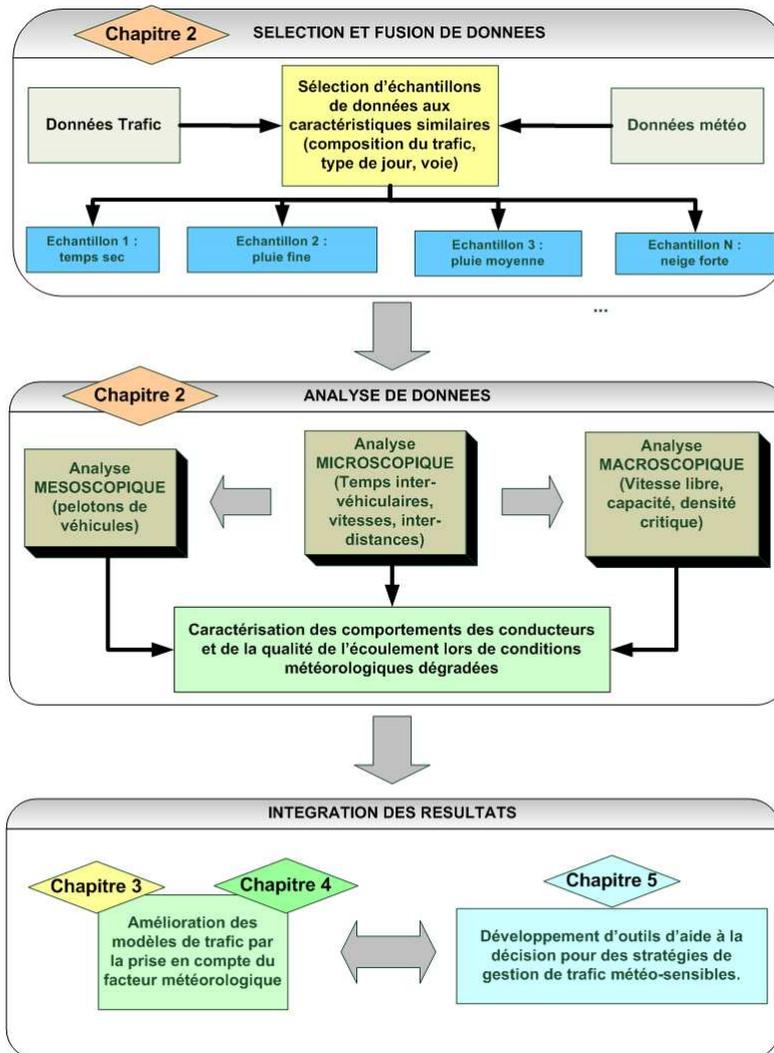


Figure 2.7 – Cadre méthodologique pour l'analyse de l'impact météorologique sur le trafic.

La figure 2.7 résume l'approche globale qui se fonde sur trois blocs principaux :

1. filtrage, fusion et sélection des données,
2. analyse des données multi-niveaux,
3. intégration des résultats.

Nous allons à présent revenir plus en détail sur les différents éléments qui composent cette méthodologie.

Préparation et qualification des données

La préparation et le filtrage des données constitue une étape préalable indispensable à la pertinence des résultats des analyses. En effet, les données sont généralement fournies sous une forme brute et peuvent contenir un certain nombre d'anomalies dues à des raisons diverses comme des dysfonctionnements de capteurs ou des incidents sur la section. Par exemple, la figure 2.8 montre le tracé, dans le plan vitesse-débit, de données brutes agrégées sur 1 minutes, fournies par la direction interdépartementale des routes Centre-Est (gestionnaire CORALY).

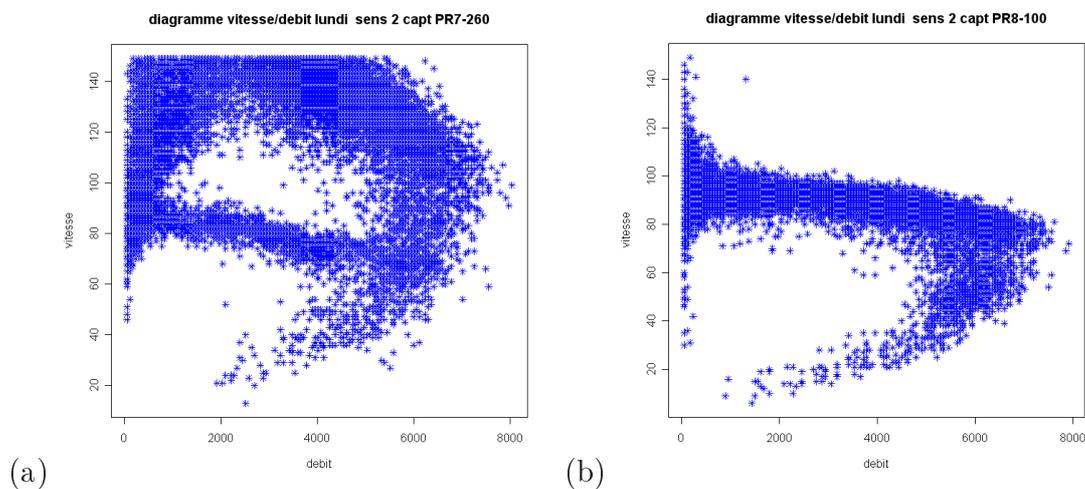


Figure 2.8 – Relation vitesse/débit pour deux capteurs différents, jour similaire, données CORALY . (a) Anomalies apparentes avec vitesses excessives et (b) Profil normal.

En traçant le nuage de points vitesse/débit pour deux capteurs pendant les mêmes périodes, des anomalies apparaissent qui traduisent un dysfonctionnement d'un des deux capteurs n'ayant pourtant pas entraîné le non-stockage des données erronées. Des vitesses irréalistes sont présentes en grand nombre pour cette section plutôt lente de l'agglomération lyonnaise (limitée à 90 km/h). Le tracé du même nuage de points pour un autre capteur de la section, situé à quelques centaines de mètres, nous indique la forme normale que devrait prendre le nuage. Les données aberrantes doivent donc être identifiées et filtrées, d'autant plus qu'à ces données aberrantes peuvent s'ajouter des données manquantes, qui prennent une importance toute particulière dans le cas de données individuelles où la nature séquentielle et temporelle intervient directement dans le calcul des variables d'interaction entre véhicules (temps et distances inter-véhiculaires). Pour pallier ces difficultés, nous développons des modules de filtrage (par exemple de simples executables en C++), qui comportent des procédures de complétion des données manquantes :

- Méthodes par imputation : il s'agit de compléter les données manquantes par des données connues,

- Méthodes par modèle : un modèle est utilisé pour estimer les données manquantes,
- Méthodes par régression : où l'on se fonde sur les corrélations entre les données pour estimer les valeurs manquantes.

Dans le cas des données individuelles, des stratégies de suppression peuvent être mises en place pour des longs dysfonctionnements de capteurs. Ensuite, des modules de filtrage doivent être développés pour traiter les valeurs aberrantes et les données manquantes. En ce qui concerne le traitement des données manquantes, nous pouvons utiliser des méthodes de remplacement par imputation qui manipulent les données qui précèdent et suivent la valeur manquante.

Fusion et échantillonnage des données

Les données trafic et météorologiques constituent deux sources différentes qui doivent être couplées de façon à associer à chaque mesure de trafic les conditions météorologiques qui lui correspondent. Idéalement, l'information météorologique doit être recueillie le plus près possible de la section étudiée, pour bien refléter les conditions réellement expérimentées par les usagers. La démarche de fusion ne pose alors pas de difficulté si la donnée météorologique est suffisamment fine, temporellement et spatialement. Toutefois, cette situation idéale reste exceptionnelle et le cas de capteurs trafic situés relativement loin d'une source de données météorologiques constitue la norme. La multiplicité des sources peut également imposer des arbitrages : prenons l'exemple d'une donnée météorologique disponible chaque minute mais située à 5 km du capteur trafic et d'une donnée météorologique horaire (station Météo-France) localisée à 2 km du capteur. Quelle information est la plus pertinente ? Ce genre de cas se prête particulièrement à des problématiques plus complexes de fusion de données pour lesquelles des outils comme les fonctions de croyance peuvent être appliqués [46].

Une fois la fusion des données effectuée, une étape-clé réside dans la sélection des données. La taille réduite des échantillons analysés peut constituer un écueil à éviter en sélectionnant des échantillons de taille équivalente pour chaque catégorie météorologique. D'autre part, comme les études préliminaires l'ont souligné, tous les facteurs exogènes doivent être maîtrisés en comparant des échantillons de données aux caractéristiques similaires :

- Même type de jour et même période de la journée,
- Type de voie,
- Composition du trafic (cf. études préliminaires),
- Autres facteurs météorologiques constants (direction et force du vent, visibilité).

Enfin, une fois que l'ensemble de ces paramètres extérieurs est neutralisé, des échantillons de données comparatifs peuvent être construits, qui seront simplement différenciés entre eux par un facteur météorologique (par exemple l'intensité des précipitations). Le nombre d'échantillons de données est naturellement limité par le

nombre de catégories météorologiques disponibles (il subsiste généralement peu de données après l'ensemble des présélections effectuées).

Analyse statistique multi-niveaux

L'intérêt d'une résolution individuelle des données trafic tient dans la variété des perspectives d'analyse qu'elles entrouvrent, en allant presque naturellement du particulier au général. L'étude peut commencer à un niveau d'analyse dit *microscopique*, où les comportements des véhicules individuels et leurs interactions sont analysés. Il s'agit de décrire et de modéliser le trafic en termes de distributions de temps inter-vehiculaires, de vitesses individuelles, d'espacements entre les véhicules. La somme des réactions individuelles des conducteurs face à la dégradation des conditions météorologiques peut ainsi se traduire par des changements de formes dans les histogrammes ou les éventuelles courbes de densité.

Par ailleurs, les données individuelles permettent d'orienter les analyses à une échelle intermédiaire, le niveau *mésoscopique*, passerelle entre le niveau microscopique des véhicules individuels et le niveau macroscopique du flot de véhicules. Le terme mésoscopique fait référence ici à des groupes, pelotons de véhicules. Il ne doit pas être confondu avec les modèles mésoscopiques en théorie du trafic, qui traitent de l'évolution des distributions des variables globales du trafic (densité, vitesse etc.), point qui sera détaillé au chapitre suivant. Ici, l'analyse mésoscopique concerne des véhicules qui se déplacent en groupes plus ou moins compacts, nommés pelotons. La définition d'un peloton est généralement associée à un seuillage des temps inter-vehiculaires (TIV critique). Un peloton est ainsi défini comme un ensemble de véhicules ayant des TIV inférieurs au TIV critique. Le premier véhicule du peloton a quant à lui un TIV supérieur au TIV critique par rapport au véhicule qui le précède, de même que le dernier véhicule du peloton par rapport au véhicule qui le suit. La figure 2.9 illustre cette notion de peloton pour une valeur du TIV critique égale à 4 s, valeur couramment adoptée sur les voies rapides en France.

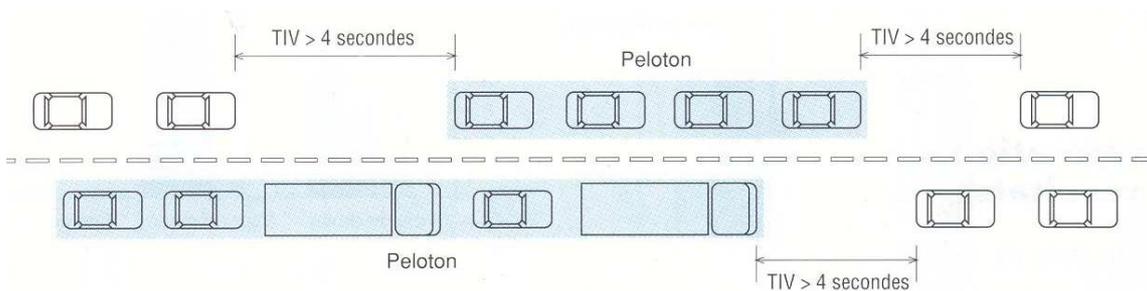


Figure 2.9 – Illustration de la notion de peloton.

L'objectif des analyses mésoscopiques est de déterminer si les conditions météorologiques ont un effet sur la formation des pelotons, leur composition et leurs caractéristiques. Nous verrons dans les applications que la définition même d'un

peloton constitue en soi une problématique intéressante, qui se complexifie en incorporant le facteur météorologique, la définition devenant elle-même dépendante de la météorologie.

Le dernier niveau d'analyse est le niveau *macroscopique*, abondamment abordé dans la littérature relative au domaine. L'originalité de nos études réside dans la maîtrise de la résolution des données, autorisée par l'usage de données individuelles. À partir des temps et distances inter-véhiculaires peuvent être déduits des débits et des densités tandis que, en partant des vitesses moyennes temporelles fournies par les capteurs, peut être estimée la vitesse moyenne spatiale, en d'autres termes la vitesse du flot. Les réductions de la vitesse libre, de la capacité et d'autres paramètres sont, par exemple, estimées à partir du calibrage de modèles de trafic, mettant ainsi en valeur le reflet des résultats microscopiques au niveau des variables globales du flot.

Intégration des résultats

La qualification des effets météorologiques sur les variables micro-, méso- et macroscopiques est une étape supplémentaire vers l'amélioration de la modélisation du trafic en intégrant une source d'incertitude pertinente : la météorologie. Le paramétrage des modèles de trafic existants sera introduit dans les analyses de ce chapitre tandis que tout le chapitre 3 sera consacré à une problématique de modélisation du trafic en intégrant la météorologie dans des modèles du premier ou deuxième ordre. Une modélisation originale sera présentée qui contribue à l'intégration de la météorologie dans les outils de modélisation du trafic. Enfin, l'intégration des résultats obtenus dans des approches d'estimation, tournées vers de futures applications en ligne, sera introduite dans le dernier chapitre du manuscrit (chapitre 5).

2.3.3 Entreposage des données et solutions logicielles

La méthodologie présentée dans ce chapitre s'appuie sur des volumes conséquents de données individuelles qui ont été filtrées, fusionnées puis pré-sélectionnées pour des analyses statistiques comparatives selon plusieurs conditions météorologiques. Après des débuts difficiles dans l'acquisition de données trafic et météorologiques exhaustives, les contacts noués avec les gestionnaires d'infrastructure (DIR centre-Est, CORALY, Laboratoire de l'Ouest Parisien, OFROU) ont permis au fil du temps d'avoir accès à des volumes de données conséquents, qui, au fur et à mesure de leur enrichissement, soulèvent la nécessité d'associer une politique d'entreposage des données à une analyse des données systématisée. L'isolement du paramètre météorologique, et la neutralisation des facteurs exogènes pouvant fausser les résultats, requièrent à la fois des outils robustes et souples. Notre démarche s'est tournée vers deux approches complémentaires (figure 2.10) :

1. Entreposage des données dans un environnement de base de données relationnelle *MySQL* (www.mysql.fr), puis migration récente vers *PostgreSQL* (www.postgresql.org),
2. Interfaçage des bases de données avec le logiciel libre d'analyse de données *R* (www.r-project.org).

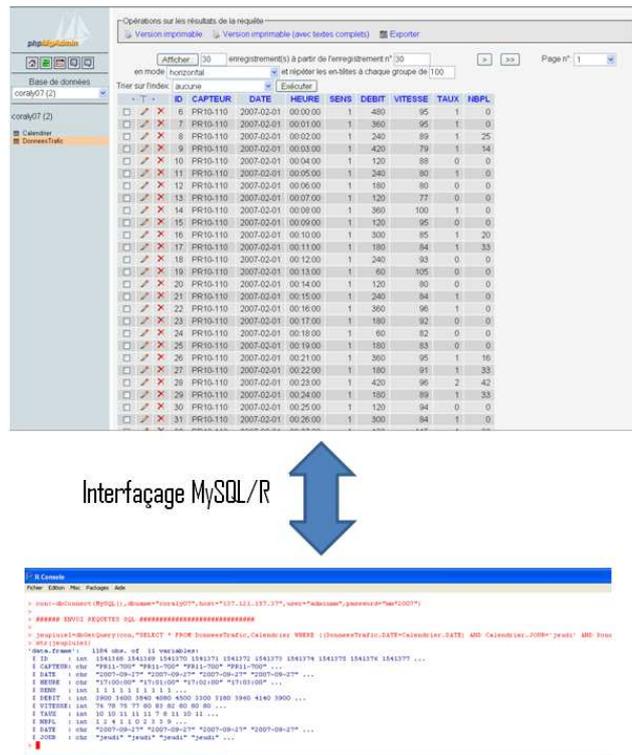


Figure 2.10 – Interfaçage MySQL/R

Tout d'abord, la procédure de filtrage est effectuée en amont de l'intégration des données trafic dans la base. Elle est ensuite implémentée de telle sorte qu'elle s'applique à chaque mise à jour de la base de données. Pour l'analyse, en établissant une connexion directe entre le logiciel *R* et le serveur de la base de données étudiée, il est possible de récupérer directement dans une variable *R* le résultat d'une requête *SQL* envoyée au serveur, permettant le début des analyses statistiques. Cette structure simple permet de pallier le point faible de *R*, à savoir la gestion des gros volumes de données, en agissant sur le serveur de base de données en tant que simple client, puis de profiter ensuite des différentes fonctions de *R* et des contributions qui l'enrichissent régulièrement.

2.4 Application de la méthodologie à des données opérationnelles

2.4.1 Description des données

Les analyses se sont appuyées sur des données trafic et météorologiques françaises et suisses. Ces deux sources de données sont de qualité générale satisfaisante, entraînant un nombre très négligeable de lignes filtrées ou traitées par des méthodes de complétion. Elles ont été associées à une information météorologique suffisamment fine : à défaut d'une information météo-routière collectée au même endroit que le capteur routier, les stations météorologiques utilisées sont localisées, dans les deux

cas, suffisamment près de la section pour refléter fidèlement les conditions au moment du recueil. L'utilisation de deux jeux de données a permis de comparer et de valider les résultats à partir de la même méthodologie.

Données françaises RN118

Le site français est une zone expérimentale mise en place par le Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien (LROP) en 2005 dans le cadre d'un retour sur expérience après la pose d'un radar CSA (contrôle sanction automatisé) sur la section. La N118 est une voie de type route à chaussées séparées par 2x2 voies, dans un environnement mixte alternant entre la rase campagne et la forêt (figure 2.11).

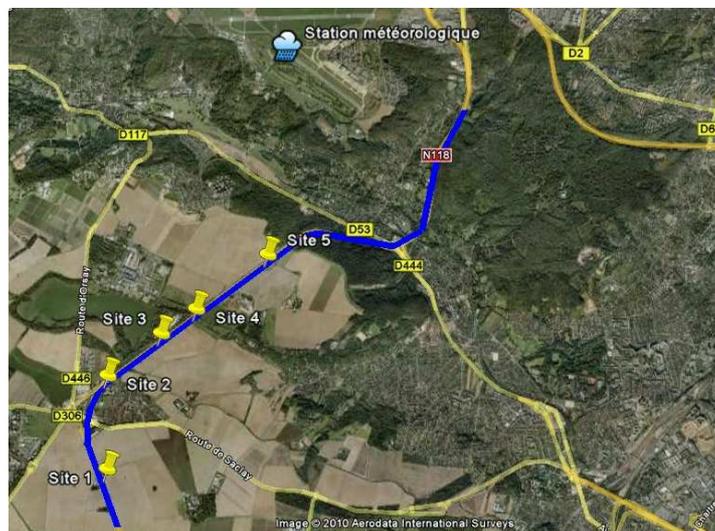


Figure 2.11 – Description de la section de recueil des données RN118 (5 premières stations).

Sur une longueur suffisante de tronçon, la RN118 a été équipée de 9 stations de mesure permettant un recueil individuel des données, dans le sens Province - Paris sur les 2 voies de circulation. Les données ont été recueillies entre 2005 et 2008, soit avant et après la pose du radar. La figure 2.11 présente les 5 premiers sites sur la section. Quant au tableau 2.2, il décrit les différents sites avec les limitations de vitesse associées.

Les données RN118 ont permis d'effectuer une étude complète à tous les niveaux d'analyse. Elles ont été recueillies sur un axe fréquenté aux heures de pointes à l'approche de Paris. Ainsi, des données en régime fluide mais aussi congestionné sont disponibles. Mais comme nous le verrons ensuite, le manque de variétés dans les conditions météorologiques pour les données disponibles peut constituer une faiblesse qui justifie l'appel à une autre source de données.

2.4.2 Prétraitement et échantillonnage

Données françaises RN118

Les données enregistrées par les boucles électromagnétiques sont des données individuelles classiques qui fournissent les informations suivantes :

- index,
- horodatage,
- TIV en secondes,
- vitesse,
- longueur et catégorie du véhicule.

Pour les résultats présentés, les sites 2, 3, 4 ont été principalement utilisés. Ils présentent en effet l'avantage d'être situés en ligne droite, avec une vitesse limitée à 110 km/h (cette configuration a été vérifiée sur le terrain au cours d'une visite technique). La construction des modalités météorologiques a été contrainte par la disponibilité des données, de sorte que seulement deux modalités de pluie ont ainsi pu être créées :

- temps sec : 0 mm/h,
- pluie fine : 0 à 2 mm/h,
- pluie modérée : 2 à 3 mm/h.

Les principes méthodologiques énoncés précédemment ont été appliqués. Pour chaque échantillon, les données ont été sélectionnées un jour typique de semaine (principalement mardi et jeudi qui présentent des profils comparables) aux mêmes périodes de la journée : les heures de pointe ont été privilégiées, ce qui implique que toutes les données se situent dans les tranches 6-10h et 15-21h. Ceci permet de maximiser les chances d'obtenir des données en congestion et ainsi de couvrir toute la panoplie des régimes de conditions de circulation. Aucun facteur météorologique additionnel notable (vent, température, visibilité) ne devait être décelé pour permettre la sélection des données. De plus, un critère supplémentaire consistait à obtenir un nombre massif de lignes pour chaque jeu de données, pour chaque voie (plus de 10000) et une composition du trafic similaire. Le tableau 2.3 décrit les jeux de données finaux après application des critères suscités :

Jeu de données	Voie lente		Voie rapide		Nb. total de veh.
	# veh	% VL	# veh	% VL	
1. Sec	36078	87.7 %	30193	92.9 %	66271
2. Pluie fine	27744	90.0 %	25126	96.5 %	52870
3. Pluie moyenne	11236	89.2 %	11406	95.5 %	22642

TAB. 2.3 – Description des données et composition du trafic. Données RN118.

La différence de taille entre les échantillons est simplement liée au fait que plus de jours de données étaient disponibles pour des conditions météorologiques clémentes, ces données ont simplement été ajoutées, sans qu'il ne s'agisse d'un effet de la

demande, les volumes restant sensiblement les mêmes sur cette section fréquentée de la banlieue parisienne. Concernant la composition du trafic, les jeux de données finaux se caractérisent par de très forts taux de véhicules légers dans le flot et sont donc parfaitement comparables.

Données suisses OFROU

Les enregistrements disponibles concernent la période 2002 à 2008. Il y a 4 350 fichiers textes comprenant le même format. Ces derniers comportent les variables suivantes :

- index,
- horodate,
- code de réserve,
- voie, direction,
- TIV en secondes,
- vitesse,
- longueur et catégorie du véhicule.

Contrairement aux données RN118 où la seule direction Province-Paris est considérée, les deux directions sont ici disponibles (figure 2.13). En fonction de la disponi-

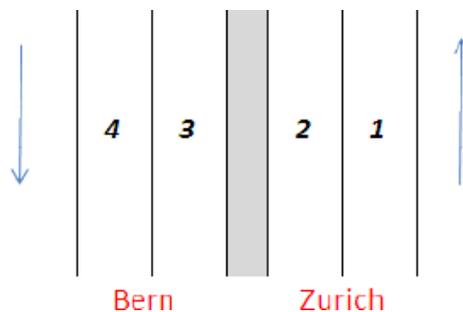


Figure 2.13 – Code des 4 voies et sens de circulation. Données suisses de l'OFROU.

bilité des données trafic et météorologiques, les catégories de précipitations suivantes ont été proposées :

- temps sec : 0 mm/h,
- pluie fine : 0 à 1 mm/h,
- pluie modérée : 1 à 3 mm/h,
- pluie forte : 3 mm/h et plus.

La sélection des données a été faite sur le modèle précédent, c'est-à-dire à partir de jours ouvrés, aux heures de pointes 6-9h et 16-21h. La structure des données est résumée dans le tableau 2.4.

Ce tableau traduit une composition du trafic comparable aux données françaises, avec des échantillons malheureusement plus petits qui n'offriront pas de données en congestion, limitant notamment l'analyse au niveau macroscopique.

Jeu de données	Nombre de PL	Nombre de VL	Total
Temps sec	1 405	17 325	18 730
Pluie fine	415	5 072	5 486
Pluie modérée	314	4 763	5 076
Pluie forte	328	3 642	3 970
Total	2 462	30 802	33 265

TAB. 2.4 – Description des données et composition du trafic. Données OFROU.

2.4.3 Niveau microscopique

L'analyse microscopique vise à décrire les variations affectant les grands paramètres décrivant le comportement des conducteurs face à la dégradation des conditions météorologiques. Les variables analysées seront donc les vitesses individuelles, les distances inter-véhiculaires et les temps inter-véhiculaires. Mais tout d'abord, faisant écho aux résultats des études préliminaires, nous présenterons la répartition des véhicules par voie.

Répartition des véhicules

Les données françaises de la RN118 ont la particularité de ne pas être toujours disponibles aux mêmes dates pour les deux types de voie, elles ne sont donc pas pertinentes pour ce type d'analyse. Concernant les données suisses, la figure 2.14 décrit la répartition générale des véhicules (tous types confondus), dans les deux directions.

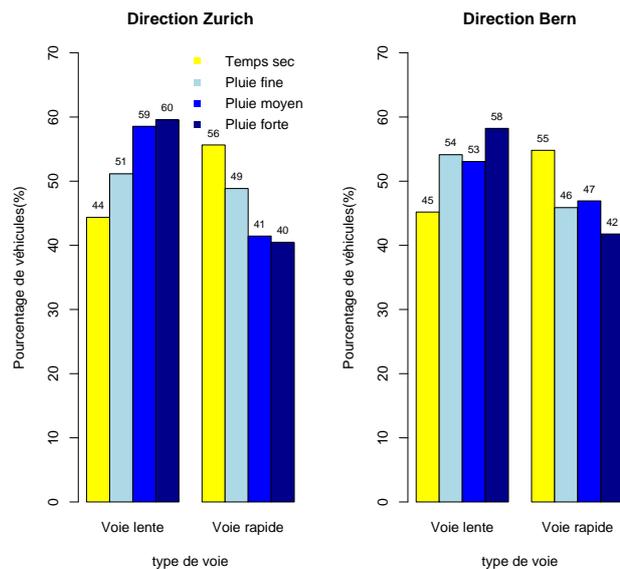


Figure 2.14 – Répartition générale des véhicules dans les deux directions. Données OFROU.

Lorsque le temps est sec, on souligne une proportion de véhicules plus importante sur la voie rapide que sur la voie lente. Dès que le temps se dégrade, la tendance s'inverse. A partir de la pluie modérée, environ 60 % des véhicules se trouvent sur la voie lente (soit une hausse d'un peu plus de 15 % par rapport au temps sec). La figure 2.16 sépare l'analyse selon la catégorie du véhicule.

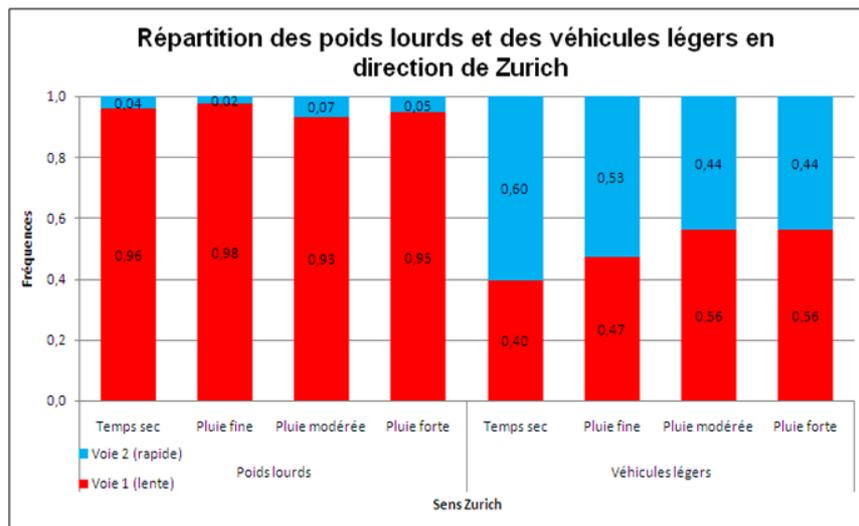


Figure 2.15 – Répartition par type de véhicule pour la direction Zurich. Données OFROU.

On constate que les véhicules légers ont tendance à se décaler vers la voie lente lorsque le temps se dégrade. On souligne en outre une hausse de 7 % entre un temps sec et une pluie fine, puis une hausse de 9 % entre une pluie fine et une pluie modérée. A partir de là, la répartition des véhicules légers reste stable. Concernant les poids lourds, il n'y a pas de différence significative, sûrement à cause du peu d'observations que l'on répertorie sur les voies rapides.

Le comportement des usagers semble différent selon la direction. En effet, la pluie fine semble être une situation intermédiaire, de transition, dans la répartition des véhicules sur les voies de la direction Zurich (51 % sur la voie lente et 49 % sur la voie rapide), alors que pour la direction Bern, l'écart est déjà plus creusé (54 % sur la voie lente et 46 % sur la voie rapide). Cependant, lorsque la pluie commence à être plus importante (modérée et forte), ce sont les usagers en direction de Zurich qui semblent être les plus prudents en se déplaçant sur la voie lente : 59 et 60 % des véhicules se situant sur la voie lente pour la direction de Zurich contre 53 et 58 % pour Bern, respectivement en pluie modérée et pluie forte. Lorsque l'on s'intéresse uniquement aux véhicules légers, le comportement des usagers semble également différent selon la direction. En effet, pour la direction de Bern, la répartition est assez stable entre une pluie fine et une pluie modérée alors qu'elle varie pour la direction de Zurich. Pour conclure sur la répartition des véhicules par voie, l'ampleur et la variabilité des résultats ne permettent pas d'attester ici la pertinence de ces effets et leur éventuelle prise en compte d'un point de vue opérationnel.

Vitesses individuelles

Les données de la RN118 offrent la possibilité d'étudier l'impact de la pluie sur les distributions de vitesse sur une section interurbaine, composée d'une voie lente et d'une voie rapide. Le débit de véhicules peut atteindre des valeurs élevées aux heures de pointes, dues aux déplacements pendulaires qui génèrent des volumes plutôt conséquents. La figure 2.16 illustre la répartition des vitesses individuelles sur la RN118, sur les deux voies de circulation. En raison de la proportion négligeable de poids lourds et du nombre conséquent de données, les résultats sont présentés ici pour l'ensemble des catégories de véhicules.

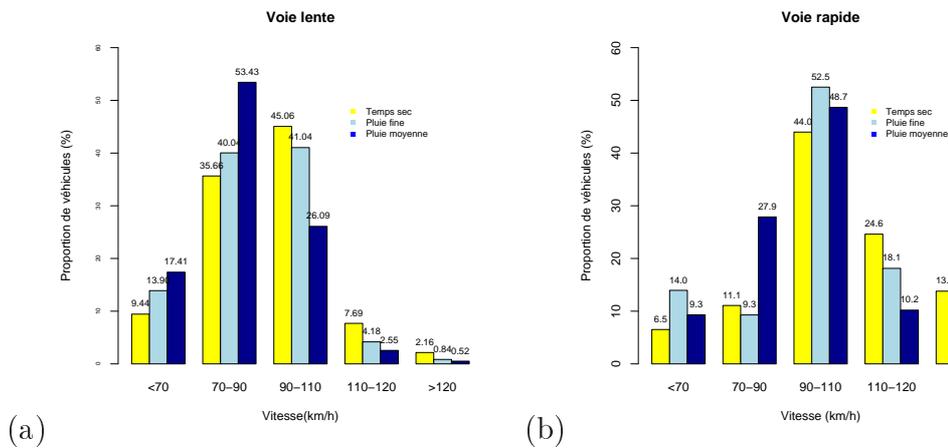


Figure 2.16 – Répartition des vitesses sur les deux voies de circulation. Données N118.

Pour la voie lente, la figure 2.16 montre une baisse significative de la proportion des vitesses supérieures à 110 km/h lors de conditions météorologiques dégradées tandis que le pourcentage de véhicules ayant une vitesse comprise entre 70 et 90 km/h est plus grand lors de conditions pluvieuses (on passe de 35 % des véhicules en temps normal à 53 % pour une pluie moyenne). Pour la voie rapide, la tendance est la même mais un phénomène différent apparaît pour la pluie fine. Un palier se dessine pour la gamme de vitesse comprise entre 90 et 110 km/h. Il semblerait donc que, face à l'apparition de la pluie, les usagers de la voie rapide adaptent simplement leur vitesse en se limitant à la vitesse autorisée. Ce comportement semble être typique des déplacements pendulaires.

L'occurrence d'une pluie fine semble donc être un état intermédiaire où les conducteurs adaptent légèrement leur vitesse en la réduisant de quelques kilomètres par heure, et ce sur les deux voies de circulation. Cette tendance se vérifie sur les données suisses dans la direction de Berne. En effet, la figure 2.17 confirme clairement un saut plus visible entre les modalités pluie fine et pluie modérée dans la proportion des vitesses supérieures à 120 km/h.

La figure 2.17 montre que un peu plus de 31 % des véhicules ont une vitesse inférieure à 100 km/h par temps sec, contre plus de 38 % par pluie fine, 52 % par pluie modérée, et plus de 58 % par pluie forte. Il faut tout de même remarquer que presque 15 % des véhicules roulent à moins de 80 km/h par pluie modérée contre moins de 7 % par pluie forte. Inversement presque 19 % des véhicules roulent au

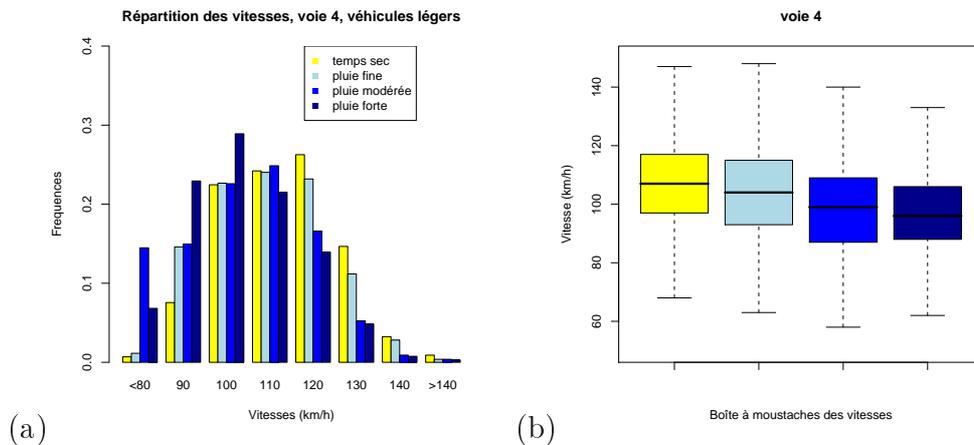


Figure 2.17 – Répartition des vitesses pour les deux directions. (a) histogramme et (b) boîtes à moustaches associées. Données suisses.

moins à 120 Km/h par temps sec, contre un peu plus de 14 % par pluie fine, un peu plus de 6 % par pluie modérée et moins de 6 % par pluie forte. Une boîte à moustaches (figure 2.17 (b)) offre une autre vue sur ces changements de distribution, qui permet de mieux visualiser les valeurs et dispersions des vitesses pour la voie lente en direction de Bern.

La vitesse des véhicules diminue proportionnellement à l'intensité de la pluie. On voit une baisse de 11 km/h entre des conditions météorologiques sèches et de pluie forte pour la médiane des vitesses, et une baisse d'environ 10 km/h pour la vitesse moyenne. Aucune tendance notable ne ressort quant à la dispersion des vitesses. Cet impact météorologique n'est pas indépendant du niveau de service. On peut s'attendre à des résultats différents selon la densité du trafic. C'est pourquoi les données suisses ont été séparées en plusieurs classes de débit :

- **Débit faible** : moins de 900 véhicules par heure,
- **Débit moyen** : entre 900 et 1409 véhicules par heure,
- **Débit élevé** : plus de 1409 véhicules par heure.

Sans tenir compte de la météorologie, il est clair qu'une évolution du débit vers des valeurs élevées entraîne une baisse naturelle de la vitesse due à une interaction croissante entre les véhicules, la demande en trafic atteignant peu à peu la capacité de l'infrastructure. En séparant par classes de débit, nos résultats ont souligné que le phénomène météorologique a le même impact sur les usagers des voies lentes et des voies rapides avec un ralentissement significatif. Concernant les vitesses, lors d'un débit faible, les baisses sont plus marquées du fait d'une faible interaction entre les véhicules, les conducteurs ayant une vitesse assez élevée vont donc la diminuer de manière plus conséquente par temps de pluie. Ainsi, nous notons une baisse de 7 km/h de la médiane des vitesses sur les voies lentes et de 6 km/h sur les voies rapides lors d'un débit faible, en passant respectivement de 117 à 110 km/h et de 125 à 119 km/h. Lorsque le débit est moyen, une diminution de la médiane des vitesses de 5

km/h est observée sur les voies lentes, elle est de 7 km/h pour les voies rapides. Pour la classe de débits élevés, on remarque des diminutions un peu moins importantes. En effet, les véhicules ne peuvent pas circuler comme ils le souhaiteraient de par les interactions trop fortes avec les autres véhicules du flot. Ils circulent à une vitesse peu élevée, la diminution est alors amoindrie. On constate ainsi une baisse de 3 km/h pour la vitesse médiane des véhicules des voies lentes et d'1 km/h pour les véhicules sur la voie rapide, en passant respectivement de 97 à 94 km/h et de 108 à 107 km/h.

Distances inter-véhiculaires

L'augmentation des distances et temps inter-véhiculaires des conducteurs par temps de pluie va de pair avec la réduction des vitesses. C'est peut-être même la caractéristique la plus intéressante à relever, la perception de perte d'adhérence, conjuguée à une perte de visibilité lorsque le phénomène pluvieux est intense, entraînant chez les conducteurs une adaptation de leurs distances de sécurité. La figure 2.18 illustre ainsi les changements dans la distribution des distances inter-véhiculaires par temps de pluie pour les données RN118.

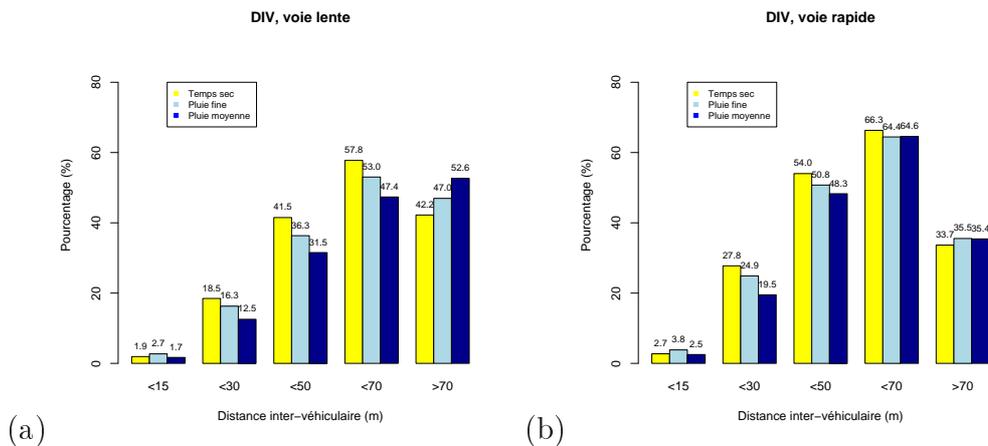


Figure 2.18 – Répartition des distances inter-véhiculaires sur les deux voies de circulation. Données N118.

Sur la figure 2.18, une baisse de la proportion des courtes distances inter-véhiculaires est clairement mise en lumière en cas de conditions météorologiques plus défavorables (pluie faible à moyenne). En effet, sur la voie de droite (voie lente), une chute d'environ 5 % de la proportion des espacements inférieurs à 50 mètres est noté. En cas de pluie d'une intensité moyenne, cette baisse atteint 10 %. Les conducteurs adaptent leurs DIV vers plus de sécurité : le pourcentage des distances inter-véhiculaires > 70m est ainsi de 42.2 % lors de conditions normales contre 47 et 52.6 % lors de l'occurrence d'une pluie respectivement fine ou moyenne. La deuxième partie de la figure semble indiquer que cet effet est présent mais moins prononcé sur la voie rapide. Les données suisses ont été alors étudiées pour amener un complément d'analyse. La figure 2.19 illustre la répartition des vitesses dans la direction de Bern

pour les deux voies de circulation.

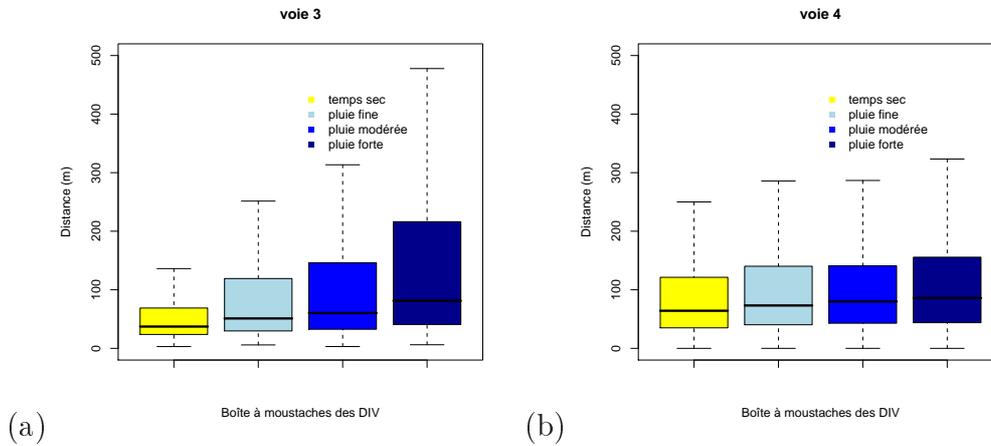


Figure 2.19 – Répartition des distances inter-véhiculaires sur les deux voies de circulation, (a) voie 3 (lente) et (b) voie 4 (rapide). Données OFROU, direction Berne.

Ainsi, on voit que pour la voie lente, la hausse la plus forte se situe entre la pluie modérée et la pluie forte, où la DIV médiane augmente de plus de 20 mètres. Entre un temps sec et une pluie forte, on assiste à une hausse de la DIV médiane de plus de 45 m, et de plus de 100 m pour la DIV moyenne. La dispersion semble liée à l'intensité du phénomène météorologique. En effet, alors que l'écart interquartile est de 45.13 par temps sec, il passe à 175.38 lors de la pluie forte. Avec la croissance de l'intensité des précipitations, on remarque également une dissymétrie prononcée des données. La dissymétrie la plus importante est constatée entre pluie modérée et pluie forte. Quant à la moindre sensibilité des conducteurs sur la voie rapide, les résultats et le volume de données ne permettent pas de conclure. Il apparaît bien cependant que, quelle que soit la voie considérée, des conditions météorologiques défavorables entraînent des inter-distances plus sécurisantes.

Temps inter-véhiculaires

L'augmentation des distances inter-véhiculaires se répercute inéluctablement sur les distributions de temps inter-véhiculaires. La figure 2.20 montre simultanément, pour les données de la RN118, les histogrammes de densité des temps inter-véhiculaires pour les modalités "temps sec" et "pluie moyenne".

La figure montre une réduction significative des temps inter-véhiculaires courts lors de conditions pluvieuses. En termes de pourcentage, sur la voie lente, cette chute est de l'ordre de 12.1 % pour les TIV inférieurs à 2 secondes pour une pluie fine. Pour une pluie d'intensité moyenne, une réduction de plus de 18 % est observée (figure 2.20). Cette réduction se retrouve dans l'augmentation des temps inter-véhiculaires compris entre 2 et 10 secondes.

Afin de mieux comparer les différentes situations météorologiques, ces distributions ont été modélisées. La modélisation des temps inter-véhiculaires a déjà fait l'objet de quelques recherches en théorie du trafic [99]. Souvent utilisée pour

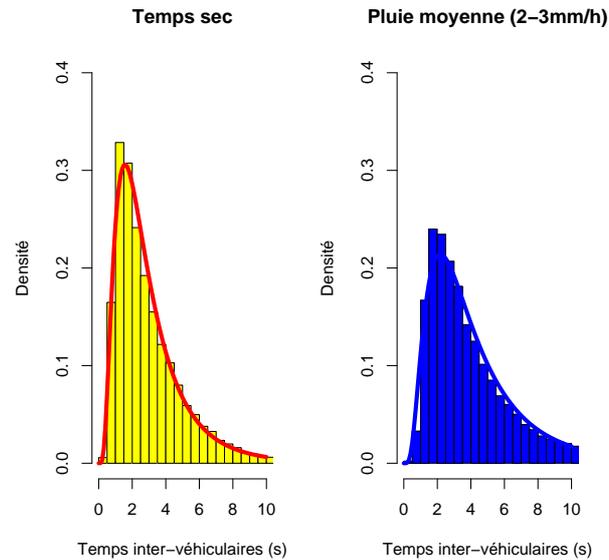


Figure 2.20 – Répartition des temps inter-véhiculaires sur la RN118, voie lente.

modéliser un produit de variables aléatoires indépendantes, la distribution log-normale est vite apparue comme une loi candidate pour la modélisation des temps inter-véhiculaires. La loi log-normale possède la densité de probabilité suivante :

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-(\ln(x) - \mu)/2\sigma^2), \quad (1)$$

où μ et σ représentent respectivement l'espérance et l'écart-type du logarithme de la variable x .

Pour chaque type de condition météorologique, l'observation des fonctions de densité apparaît comme un moyen synthétique et alternatif de confirmation des résultats entrevus avec les histogrammes (figure 2.21). Notons qu'avec le nombre important de données (au moins 10000 observations pour chaque échantillon), les tests d'adéquation conduiront systématiquement au rejet de l'adéquation de la loi théorique. En particulier, il est logique que le test de type Kolmogorov-Smirnov, fondé sur l'écart maximal entre la distribution théorique et les échantillons, rejette systématiquement l'hypothèse d'une distribution log-normale à cause de la grande taille de nos échantillons.

Pour les données RN118, la figure 2.21 confirme clairement que la densité des temps inter-véhiculaires inférieurs à 3 s est plus grande lors de conditions non pluvieuses tandis que cette baisse se traduit par une augmentation de densité pour les modes "pluie fine" et "pluie moyenne" pour des TIV allant de 3 à 10 secondes. En d'autres termes, plus l'intensité de la pluie est forte, plus faible est la densité des TIV courts. La deuxième partie de la figure 2.21 représente les fonctions de répartition empiriques des trois distributions. Ce graphique confirme l'effet météorologique avec des courbes qui croissent plus lentement vers 1 en cas de pluie. Les données suisses donnent des résultats similaires et une bonne adéquation à la loi log-normale proposée, que ce soient pour les voies lentes ou rapides (figure 2.22).

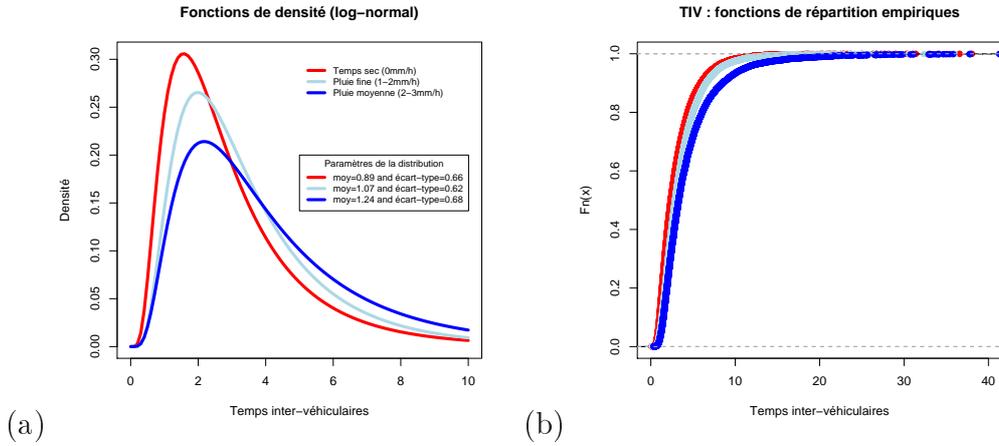


Figure 2.21 – Modélisation des temps inter-véhiculaires sur la RN118 par une loi log-normale, voie lente. (a) fonctions de densité et (b) fonctions de répartition.

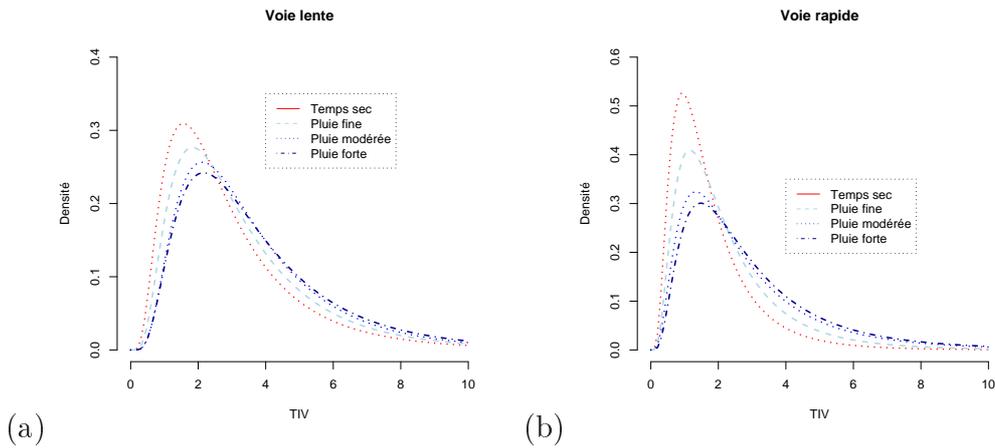


Figure 2.22 – Modélisation log-normale des temps inter-véhiculaires des données suisses (a) voie lente et (b) voie rapide. Données OFROU.

Sur les données de l'autoroute suisse, l'apparition de la pluie semble avoir le même impact sur les usagers des voies lentes et des voies rapides. Tous augmentent leur TIV de manière assez significative lorsqu'il commence à pleuvoir. La différence entre pluie fine et temps sec est plus marquée sur les voies rapides. En distinguant les différentes classes de débit, les études ont également montré que cette différence était accentuée pour les débits élevés.

2.4.4 Niveau mésoscopique : analyse des pelotons

A la suite de l'analyse microscopique, l'analyse de données permet d'observer le comportement des véhicules en termes de pelotons. En guise d'introduction, rappelons la définition du terme peloton proposée par le Highway Capacity Manual [67] :

"a group of vehicles or pedestrians traveling together as a group, either voluntarily or unvoluntarily because of signal control, geometrics, or other factors."

Il a été rappelé dans la section 2.3 que la définition d'un peloton se fondait généralement sur la notion de temps inter-véhiculaire critique (*critical headway*), que nous noterons H_0 . Cette valeur fait office de seuil qui détermine le TIV maximum au sein d'un peloton et sépare le premier et dernier véhicule des autres. En France, la valeur de 4 secondes est souvent utilisée d'après des considérations empiriques, et ce, quelles que soient les conditions météorologiques. Pourtant, ce TIV critique constitue une valeur déterminante de la structure des pelotons ainsi définis. Par exemple, la figure 2.23 montre l'évolution du nombre de véhicules dans un peloton pour les données suisses selon la valeur du TIV critique choisi.

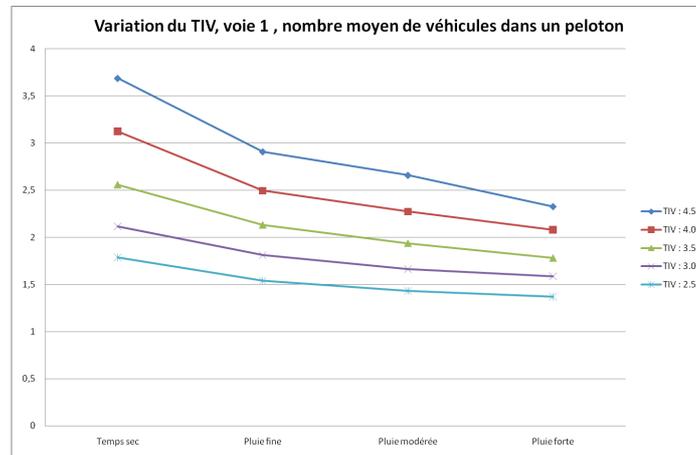


Figure 2.23 – Variation du nombre moyen de véhicules dans un peloton en fonction de la météorologie et du TIV critique.

Il apparaît que le nombre moyen de véhicules dans un peloton dépend conjointement de la météorologie et de la valeur du TIV critique choisi. Concernant ce dernier, les analyses microscopiques ont clairement montré que les conducteurs augmentaient leurs temps inter-véhiculaires en cas de conditions météorologiques défavorables. En particulier, des différences claires sont apparues entre les diverses distributions et il est logique de considérer le TIV critique comme un paramètre dépendant lui-même de la météorologie. Considérer une valeur constante (par exemple 4 secondes) pourrait biaiser les résultats relatifs aux pelotons. Il reste donc à déterminer une méthodologie de définition de ce paramètre, quelles que soient les conditions météorologiques. Dans cette optique, la médiane de chaque distribution peut faire office de TIV critique. Etant données les formes des distributions des temps inter-véhiculaires observées, nous considérons que cet indicateur robuste constitue un seuil raisonnable pour segmenter les véhicules en interaction ou non. De plus, une restriction supplémentaire est apportée, qui consiste à analyser essentiellement les pelotons composés de 4 véhicules ou plus. Le tableau 2.5 présente ainsi, pour les données RN118, les caractéristiques générales des pelotons obtenus sur les différentes voies. Les valeurs

du temps inter-véhiculaire critique sont de 3 secondes par temps sec, 3.61 s lors d'une pluie fine et de 4.44 s pour une pluie moyenne. Ces variations dans le TIV critique en fonction de la météorologie semblent bien refléter les changements observés dans les distributions des TIV au cours de l'analyse microscopique.

Cond. Meteo.	Voie lente				Voie rapide			
	% veh. en peloton	nb. veh. moyen	nb. veh. median	% veh. dans les pelotons	% veh. en peloton	nb. veh. moyen	nb. veh. median	% veh. dans les pelotons
Temps sec ($H_0=3$ s)	53	6.41	5	89.6	75.3	8.67	7	93.4
Pluie fine ($H_0=3.61$ s)	57.3	6.32	5	91.6	76.2	9.19	7	96.7
Pluie moyenne ($H_0=4.44$ s)	60.5	7.07	6	89.6	82.03	11.34	8	95.5

TAB. 2.5 – Description des caractéristiques des pelotons, données RN118 (H_0 : TIV critique).

Le tableau 2.5 met en exergue une légère tendance à la formation de pelotons lors de conditions météorologiques défavorables. Quelle que soit la voie de circulation considérée, la proportion de véhicules dans des pelotons d'au moins quatre véhicules devient plus grande lorsqu'il pleut. Cette augmentation est de 7.5 % lors d'une pluie moyenne. Concernant le nombre moyen de véhicules dans un peloton, il n'y a pas de résultats significatifs, au contraire de ce que laissaient entrevoir les données suisses. Ceci vient sûrement du fait que les pelotons non significatifs (1 ou 2 véhicules) ont été retirés de la comparaison. Par rapport au pourcentage de véhicules légers dans un peloton, il est difficile de faire ressortir une tendance, les variations observées pouvant être liées aux petites variations dans la composition du trafic.

D'autre part, la vitesse moyenne spatiale de chaque peloton de plus de quatre véhicules a été calculée. La figure 2.24 montre pour les deux voies de circulation les boîtes à moustaches des vitesses de peloton.

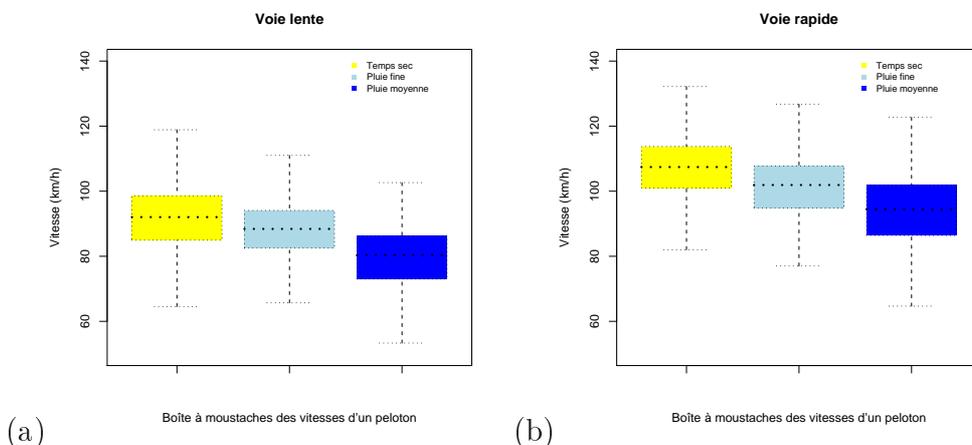


Figure 2.24 – Boîtes à moustaches des vitesses moyennes spatiales des pelotons. Données RN118. (a) voie lente et (b) voie rapide.

Les résultats sont éloquentes : la baisse de la vitesse d'un peloton est fonction de l'intensité des précipitations observée. Par exemple, une chute de la vitesse médiane d'environ 20 % est observée en passant de conditions normales à une pluie d'intensité moyenne. La figure 2.24 montre également les différences de profils de vitesse entre les différentes voies. Aucune différence significative n'est notée entre voie lente et voie rapide, si ce n'est une dispersion des vitesses plus élevée en cas de pluie moyenne pour la voie rapide.

2.4.5 Niveau macroscopique

À partir des données individuelles, il est possible de calculer les principales variables caractéristiques du flot que sont la vitesse moyenne spatiale u (km/h), la densité ρ (veh/km) et le débit q (veh/h). La première méthode consiste à faire directement les agrégations au pas de temps souhaité (1 min, 6 min), puis à calculer la vitesse moyenne spatiale par une moyenne harmonique des vitesses temporelles fournies par les capteurs. La concentration peut ensuite être déduite de la relation $q = \rho u$. La deuxième méthode consiste, pour n'importe quelle période d'agrégation, à calculer le débit ou la densité à partir des temps et distances inter-véhiculaires (TIV et DIV) des n véhicules ayant franchi le capteur, comme suit :

$$q = \frac{n}{\sum_{i=1}^n TIV(i)} \quad (2)$$

et

$$k = \frac{n}{\sum_{i=1}^n DIV(i)}. \quad (3)$$

La figure 2.25 montre le nuage des données brutes agrégées (première méthode) dans le plan vitesse/débit des données RN118 pour la voie rapide. L'effet météorologique peut être facilement visualisé, les nuages de points par temps plus dégradés étant généralement sous les autres.

Les changements simultanés des variables macroscopiques peuvent être appréhendés à travers le diagramme fondamental, qui décrit les relations entre vitesse, débit et densité. Dans l'optique d'intégrer les effets météorologiques dans une modélisation plus sophistiquée, et par la suite de développer des stratégies de gestion de trafic météo-sensibles, l'objectif premier réside dans le paramétrage du diagramme fondamental en fonction de l'intensité des précipitations. Pour analyser l'impact météorologique, un modèle générique et suffisamment flexible est requis. Pour cette analyse empirique et ce premier paramétrage, nous avons choisi le modèle de Van Aerde [139], dont la capacité d'ajustement aux données empiriques a déjà été largement démontré. En comparaison avec le modèle de Pipes généralisé ou le modèle de Greenshields, l'originalité de ce modèle est un degré de liberté supplémentaire autorisant une vitesse à capacité différente de la vitesse libre. Le modèle de Van Aerde contourne ainsi la contrainte d'une relation vitesse/débit parabolique. Le calibrage du modèle requiert quatre paramètres, c_1 , c_2 , c_3 et m , fonction de la vitesse libre u_f , de la capacité q_{max} , de la densité maximale ρ_M et de la vitesse à capacité

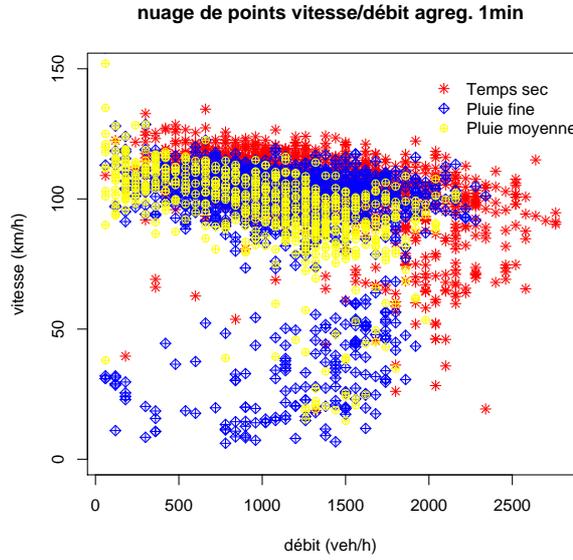


Figure 2.25 – Tracé du nuage de points brut des données agrégées dans le plan vitesse/débit. Véhicules légers, voie rapide. Données RN118.

u_c . Les paramètres sont définis comme suit :

$$c_1 = mc_2, \quad (4)$$

$$c_2 = \frac{1}{\rho_M(m + \frac{1}{u_f})}, \quad (5)$$

$$c_3 = \frac{-c_1 + \frac{u_c}{q_{max}} - \frac{c_2}{u_f - u_c}}{u_c}, \quad (6)$$

$$\rho = \frac{1}{c_1 + c_3u + \frac{c_2}{u_f - u}}, \quad (7)$$

$$m = \frac{2u_c - u_f}{(u_f - u_c)^2}, \quad (8)$$

où c_1 est une constante homogène à une distance (km), c_2 une constante d'espacement (km^2/h), et c_3 une autre constante d'espacement. Le calibrage a été effectué grâce à une heuristique d'optimisation (*SPD CAL*) développée par Rakha et Van Aerde [139]. Cette procédure de calibrage se fonde sur une version non linéaire des moindres carrés. La procédure fait varier les valeurs des paramètres avec une méthode d'optimisation ascendante et sélectionne les valeurs qui minimisent la somme des carrés des distances orthogonales.

La figure 2.26 montre les résultats d'un tel calibrage sur le nuage de points précédemment tracé. Ce calibrage permet ensuite de mieux évaluer l'impact météorologique sur les paramètres du modèle.

A la lumière de ce calibrage, l'impact de la pluie sur le diagramme fondamental et, ainsi, la qualité de l'écoulement, est clair. Tout d'abord, la densité maximale n'est pas affectée par la pluie. Ce fait est en accord avec de simples considérations

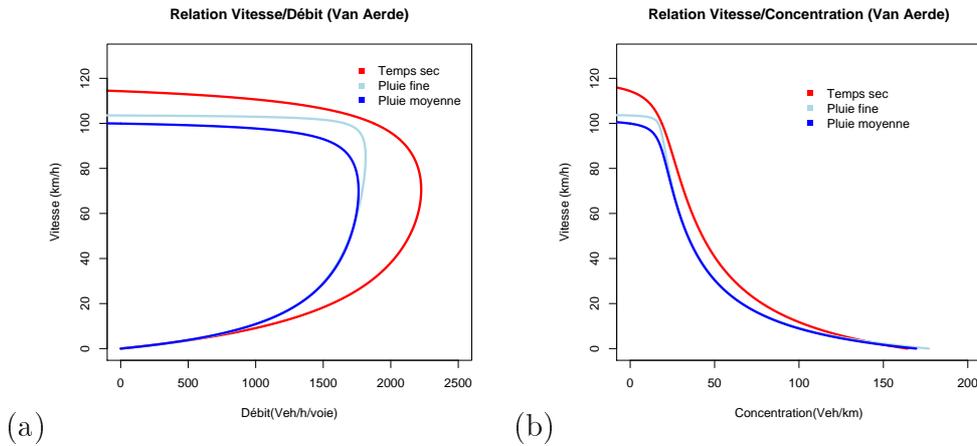


Figure 2.26 – Calibrage du modèle de Van Aerde. Véhicules légers, voie rapide. Données RN118.

physiques : le nombre maximum de véhicules sur une section est invariant, car fonction exclusive des considérations géométriques de la section. En ce qui concerne les autres paramètres, une baisse d'environ 8 % de la vitesse libre est observée en cas de pluie fine, cette réduction passant à 12.6% lors d'une pluie modérée. Quant à la capacité, elle décroît de 18.5 % en cas de pluie fine et de 21 % en cas de pluie moyenne. Cette chute de la capacité est directement liée aux augmentations de temps intervéhiculaires précédemment notées. Pour la voie lente, les résultats sont sensiblement les mêmes. Concernant les données suisses de l'OFROU, on regrettera que le nombre moins élevé de données ne permette pas, après agrégation, de présenter des résultats pertinents, à cause notamment d'un nombre insuffisant de données dans la partie congestionnée.

2.5 Conclusions

Dans ce chapitre, une caractérisation multi-niveaux des effets météorologiques sur le trafic a été entreprise. Tout d'abord, fondée sur l'analyse de la bibliographie existante et sur quelques études préliminaires, une méthodologie a été proposée, visant à systématiser l'étape de préparation et de sélection des données pour les analyses comparatives. La procédure vise à écrémer les données initiales de façon à contenir les éventuels biais rendus possibles par des aspects collatéraux de nos analyses :

- type de jour (jours de semaine, week-end),
- période de la journée (heure creuse ou heure de pointe),
- type de section (nombre de voie, limitation de vitesse),
- géométrie et topographie des sections (lignes droites, virages, descente/montée),
- composition du trafic (% véhicules légers et poids lourds),
- autres facteurs météorologiques (vent, visibilité, températures extrêmes).

Cette systématisation de la sélection des données permet ensuite de créer des sous-échantillons aux caractéristiques similaires, différenciés essentiellement par les conditions météorologiques relevées, c'est-à-dire dans notre cas le niveau de précipitation. La construction de tels échantillons requiert ainsi un volume initial de données conséquent, afin d'atteindre pour chaque sous-échantillon résultant une taille suffisante, et éviter un phénomène contre-productif de sur-apprentissage.

La deuxième étape du processus méthodologique propose une analyse multi-niveaux, dont le principe général repose sur l'utilisation de données trafic individuelles, permettant une analyse du microscopique au macroscopique. Pour ce faire, les résultats présentés se sont appuyés sur deux échantillons de données individuelles récoltées auprès de nos partenaires :

1. Données N118 : ces données françaises ont été recueillies dans un sens de circulation sur une 2*2 voies limitée à 110 km/h. Le volume de données a permis de mener une analyse du microscopique au macroscopique.
2. Données OFROU : ces données proviennent d'une autoroute suisse à 2 voies limitée à 120 km/h. Une plus grande variété de conditions météorologiques a permis d'avoir une classe en plus mais le volume de données plus réduit a limité les analyses à des niveaux plus agrégés. Ces données nous ont permis d'apporter des compléments ou des points de comparaison par rapport aux données françaises.

L'analyse multi-niveaux a mis en exergue des effets significatifs des précipitations sur les comportements des conducteurs aux différents niveaux d'analyse :

- **Niveau microscopique** : les conducteurs adaptent globalement leur comportement par rapport à des conditions de circulation dégradées. Ils réduisent leurs vitesses et augmentent leurs distances et temps inter-véhiculaires. Pour les données françaises, une réduction de 18 % des TIV courts (moins de 2 secondes) est observée sur la voie lente ainsi qu'une baisse des espacements courts (< 50 m) pouvant aller jusqu'à 20 %. Au niveau des temps inter-véhiculaires, une modélisation log-normale météo-sensible a été réalisée et permet de mettre en valeur les différences entre les classes météorologiques.
- **Niveau mésoscopique** : partant du constat que la définition des pelotons adoptée dans la littérature ne permet pas de s'adapter aux variations des distributions selon les conditions météorologiques, une définition et une construction des pelotons dépendante de la météorologie a été proposée, qui met en valeur une tendance à la formation de peloton lors de conditions défavorables. Les vitesses moyennes spatiales de ces groupes de véhicules diminuent également avec l'augmentation de l'intensité des précipitations (- 20 % de réduction de la vitesse moyenne d'un peloton en passant de conditions ensoleillées à une pluie d'intensité moyenne). Toutefois, des approches provenant de la reconnaissance des formes ou de la classification non supervisée pourraient amener un cadre théorique pertinent pour une définition mieux justifiée de ces groupes de véhicules.

- **Niveau macroscopique** : l'impact de la pluie sur la qualité de l'écoulement a été appréhendé au travers de la forme du diagramme fondamental et de ses paramètres clés. En calibrant le modèle de Van Aerde, une baisse de la capacité allant de 18.5 à 21 % en fonction de l'intensité de la pluie est constatée. Concernant la vitesse libre, les réductions sont de l'ordre de 8 à 12.6 %. La pluie n'a logiquement pas d'impact sur la densité maximale.

La principale originalité des contributions présentées dans ce chapitre réside ainsi dans une approche inédite et systématique qui réduit petit à petit, à partir des données initiales, l'échelle d'analyse (du micro- au macroscopique). Les résultats présentés au niveau microscopique et mésoscopique viennent combler les lacunes des travaux existants.

Au niveau macroscopique, les résultats fournissent des premières références pour les sections interurbaines françaises. Les résultats présentés sont en accord avec une autre étude effectuée à partir de données agrégées [14], qui sera présentée au chapitre 5. Il est clair que les quantifications présentées dans cette section sont à relativiser et restent valables pour des sections inter-urbaines françaises et suisses. Le tableau 2.6 présente ainsi un comparatif des résultats avec quelques études récentes de par le monde.

Pays	Type de section	Baisse vitesse libre	Baisse capacité	Ref.
France	interurbain	8% – 12.5%	18.5% – 21%	[13]
France	périphérique urbain	9%	15.5%	[14]
Canada	voie rapide urbaine	10%		[138]
USA	3 sites périurbains	6% – 9%	10% – 11%	[124]
Japan	autoroute urbaine	5%	6 – 9%	[26]

TAB. 2.6 – Comparatifs des réductions de la vitesse libre et la capacité pour différentes études. Intensité de pluie fine.

D'après le tableau 2.6, si les résultats sur la vitesse libre semblent cohérents avec la plupart des études voisines, des variabilités sont constatées pour les réductions de capacité. Ces différences peuvent provenir des différences régionales, comme évoqué en introduction, mais également des méthodes mêmes d'estimation de la capacité qui peuvent différer d'une étude à l'autre. De plus, même si le tableau présente des résultats pour une intensité de pluie fine, des variations dans la catégorisation des intensités de pluie peuvent subsister, faisant apparaître un besoin de normalisation au niveau mondial.

Modélisation du trafic et intégration des effets météorologiques

Sommaire

3.1	Introduction	68
3.2	Etat de l'art des modèles de trafic	69
3.2.1	Modélisation microscopique	69
3.2.2	Modélisation macroscopique	70
3.2.3	Modélisation mésoscopique ou cinétique	77
3.2.4	Conclusion et contexte du travail de recherche présenté	79
3.3	Contribution à la modélisation du 2ème ordre	81
3.3.1	Formulation générale Vlasov	81
3.3.2	Fermetures des termes d'accélération et de relaxation	83
3.3.3	Dérivation des équations macroscopiques	85
3.3.4	Propriétés du système et analyse de stabilité linéaire	86
3.3.5	Vers un modèle hybride : équation de transport sur les distributions de temps inter-véhiculaires	90
3.3.6	Synthèse	90
3.4	Intégration des effets météorologiques dans les modèles	91
3.4.1	Modèles du premier ordre	91
3.4.2	Modèle du deuxième ordre et système hybride	94
3.5	Conclusion	95

3.1 Introduction

Les différents résultats empiriques nous ont permis de mieux caractériser les effets météorologiques, aussi bien sur les comportements individuels des usagers que sur les grandes variables qui régissent l'écoulement du trafic. Le phénomène météorologique, représenté dans ce travail par un paramètre désignant le niveau de précipitation, constitue donc un facteur d'incertitude qui doit être intégré dans la modélisation du trafic. Depuis les années 50 et les travaux pionniers de Lighthill et Whitham [97], la modélisation du trafic a drainé un nombre important de travaux qui ont tous contribué à faire de la théorie du trafic un domaine de recherche à part entière. Les modèles de trafic sont aujourd'hui à la base de nombre d'outils d'exploitation utilisés au quotidien par les gestionnaires de trafic. À la lumière des conclusions du chapitre 2, il apparaît que l'introduction des effets météorologiques dans ces modèles apporte des bénéfices certains, aussi bien d'un point de vue théorique avec l'enrichissement des modèles, que d'un point de vue opérationnel avec la faculté de ces derniers à s'adapter, en temps réel, à des conditions météorologiques changeantes. Néanmoins, au moment d'entreprendre cette tâche, il convient d'avoir une vision claire des différentes approches de modélisation, d'évaluer l'intérêt de chacune d'entre elles pour ensuite déterminer dans laquelle l'intégration des effets météorologiques pourrait s'avérer la plus pertinente. Dans la section 3.2, les différentes classes de modèles de trafic seront exposées de la façon la plus synthétique possible, de manière à donner un aperçu des travaux fondateurs des différents courants de modélisation mais aussi à introduire certains concepts manipulés par la suite. Dans la section 3.3, les contributions seront amorcées par une formulation de type Vlasov, qui régit l'évolution des distributions des variables globales du trafic routier. Cette formulation Vlasov permet de proposer une hiérarchie de modèles et de lier les différentes classes de modélisation entre elles. Ainsi, il est possible de dériver, à partir de l'équation originale, aussi bien des modèles microscopiques que des modèles macroscopiques du premier ou deuxième ordre. De par la richesse que de telles classes de modèles proposent, notre travail théorique s'est concentré sur la proposition d'un nouveau modèle macroscopique à deux équations relatif à des fermetures particulières. Les fondements théoriques ainsi que la dérivation du modèle seront présentés dans la section 3.3, ainsi que les propriétés générales du modèle macroscopique résultant. Par la suite, l'intégration du paramètre météorologique, et, ainsi, des résultats du chapitre 2, sera présentée, à travers le paramétrage des lois d'équilibre. Nous verrons que, si l'intégration du paramètre météorologique dans le modèle LWR est pertinente, le modèle à deux équations offre des possibilités supplémentaires de modéliser ce phénomène. Les autres résultats empiriques sur le comportement des conducteurs ne seront pas laissés de côté dans la mesure où une équation mésoscopique sur l'évolution des distributions de temps inter-véhiculaires sera couplée au modèle initial, qui nous permettra finalement de former un système hybride méso-macro intégrant les effets météorologiques.

3.2 Etat de l'art des modèles de trafic

Cette section vise à mieux décrire le contexte dans lequel s'intègrent nos recherches. Depuis les années 30 et les travaux de Lighthill et Whitham [97], la modélisation du trafic a été un domaine d'application attractif pour bon nombre de chercheurs venant de disciplines variées. La tentation de proposer, à l'instar de la mécanique des fluides, un modèle de référence pour décrire la dynamique du trafic, aura inspiré un nombre pléthorique de travaux tout au long du vingtième siècle. Au vu du nombre et de la diversité des travaux proposés, ce serait une galéjade que de prétendre en donner en quelques pages un recensement exhaustif. De leurs propres examens, les chercheurs en modélisation du trafic s'accordent sur le fait que le modèle de trafic idéal n'existe pas [113]. Les travaux doivent être guidés par les applications directes et les cas d'utilisation. D'autant plus que les modèles de trafic sont maintenant au centre d'enjeux économiques ou de sécurité cruciaux : limiter la congestion, mieux prévoir les temps de parcours et, de façon générale, optimiser l'usage des réseaux. Il existe donc plusieurs modèles de trafic qui doivent être choisis en fonction des applications visées. Mais ce constat ne sous-entend pas pour autant un abandon progressif des développements théoriques et des approches mathématiques, qui peuvent amener de la richesse dans la description de certains phénomènes et aider à mieux les comprendre.

Le domaine de la modélisation du trafic est généralement divisé en trois catégories, selon l'échelle de modélisation adoptée : microscopique, macroscopique et mésoscopique (cinétique). C'est donc tout naturellement que notre présentation des classes de modèles de trafic suivra ce paradigme.

3.2.1 Modélisation microscopique

Dans le chapitre 2 portant sur la quantification des effets météorologiques, le terme microscopique a été utilisé pour décrire le comportement individuel (vitesse, temps et distance inter-véhiculaires) des conducteurs. Au niveau des modèles de trafic, le niveau microscopique considère également les véhicules comme des particules dont il faut décrire la dynamique. Ainsi, les différents modèles visent à s'approcher le plus possible du comportement réel d'un véhicule en fonction de son environnement. Partant, les modèles de poursuite (*follow-the-leader*) cherchent à décrire l'accélération de chaque véhicule par rapport à son poursuivant. Des premiers modèles de poursuite, on peut donner, comme l'a exprimé Gazis [51], la formulation standard

$$\ddot{x}_i(t+T) = a(v_i(t))^m \frac{(v_{i-1}(t) - v_i(t))}{(x_{i-1}(t) - x_i(t))^\ell}, \quad (1)$$

avec les paramètres T , a , m et ℓ . Cette formule repose sur l'idée que l'accélération au temps $t+T$ dépend de la vitesse du véhicule au temps t , mais aussi de la différence de vitesse entre ce véhicule et son prédécesseur, ainsi que de la distance qui les sépare. Par la suite, d'autres modèles de poursuite ont été proposés, décrivant l'adaptation des véhicules individuels, en prenant également en compte les distances inter-véhiculaires et, ce faisant, une distance de sécurité "désirée". Parmi eux, le modèle de Newell [109, 110] et ses multiples variantes sont toujours très utilisés et

étudiés [41]. Dans le modèle de Newell, les conducteurs adaptent leur vitesse en fonction d'une vitesse qui dépend de la distance entre les véhicules : c'est la vitesse optimale, qui correspond à la vitesse vers laquelle un conducteur tendrait par rapport à un certain espacement. En notant cette vitesse V_0 , on obtient

$$\dot{x}_{i+1}(t + \Delta t) = V_0(x_i(t) - x_{i+1}(t)), \quad (2)$$

où le temps Δt correspond au temps mis par le conducteur pour changer de vitesse. Ce type de modèle repose sur des hypothèses simplificatrices du comportement des conducteurs et postule que ces derniers réagissent toujours à un stimulus créé par le véhicule précédent. Dans le champ de la modélisation microscopique, les modèles à automates cellulaires peuvent être convoqués [30, 107], même si ils pourraient également faire la passerelle entre les niveaux micro- et macroscopiques (si les véhicules sont décrits individuellement, la simplicité des comportements garantit un bon comportement macroscopique). Rappelons qu'un automate cellulaire est un ensemble de n cellules qui peuvent prendre un nombre d'états fini. Le temps est discrétisé et un ensemble de règles est appliqué à chaque pas de temps pour décrire le nouvel état du système. Dans le modèle de Nagel-Schreckenberg [107], ces règles sont :

- **Accélération** : si $v < v_{max}$ et si l'espace est suffisant alors la vitesse est augmentée de 1 unité ($v \longleftarrow v + 1$),
- **Décélération** : s'il existe un autre véhicule à une distance $d < v$, alors $v \longleftarrow v - 1$,
- **Freinage aléatoire** : la vitesse de chaque véhicule est réduite de 1 unité avec une probabilité p ,
- **Mouvement** : les véhicules avancent.

Les modèles à automates cellulaires constituent ainsi des modèles simples, aux hypothèses raisonnables, faciles à implémenter. Cette même simplicité pourrait leur permettre d'être utilisés pour des applications sur des grands réseaux.

En fait, de manière générale, les modèles microscopiques présentent un intérêt certain de par leur simplicité et leur compréhension. Cependant, on peut penser que la détermination du comportement d'un véhicule par rapport à celui qui le précède trouve surtout sa justification dans une certaine classe de régime, plutôt dense, où les véhicules se placent effectivement en configuration "suiveur" (*follow the leader*). Dans le cas d'un régime totalement fluide et d'une densité faible, il y a en revanche fort à parier que les considérations de type "voiture suiveuse" n'auraient plus cours.

3.2.2 Modélisation macroscopique

Modélisation du premier ordre : modèle LWR

Le niveau microscopique est généralement opposé au niveau macroscopique, que nous avons précédemment abordé. Il est clair que le trafic routier, de par la diversité et le nombre des particules qui le composent, constitue intrinsèquement un processus

dynamique discret. Pourtant, les premières tentatives pour le modéliser de façon continue sont apparues très tôt. Le trafic a été donc modélisé par analogie avec la mécanique des fluides, le flot étant considéré comme un fluide s'écoulant dans un canal. Cette échelle de représentation est particulièrement propice aux applications à de larges réseaux routiers. Les véhicules du flot peuvent ainsi être traités selon la dynamique des particules qui composent un écoulement. L'effort pionnier de Lighthill et Whitham, et parallèlement de Richards [97], était fondé sur une équation classique de conservation des véhicules

$$\partial_t \rho + \partial_x q = 0, \quad (3)$$

où ρ représente la densité macroscopique et q le débit. Ensuite, il est apparu naturel de considérer q comme le produit de la vitesse moyenne u et de la densité ρ

$$q = \rho u. \quad (4)$$

La vitesse moyenne u , la densité ρ et le débit q assument le rôle des variables hydrodynamiques. Il est intéressant de noter qu'historiquement, le modèle LWR était proposé dans une formulation densité/débit qui ne faisait pas intervenir la vitesse.

Il manquait une fermeture au système, qui a été complété par une relation phénoménologique vitesse-densité

$$u = u^{eq}(\rho). \quad (5)$$

Cette relation correspond donc au diagramme fondamental en théorie du trafic. Plusieurs formes peuvent être proposées pour le diagramme fondamental (5), qui est en général supposé concave pour la relation débit/densité. Le choix de la forme du diagramme fondamental découle avant tout de l'analyse des données empiriques collectées par les capteurs boucles puisque l'objectif est bien de proposer la forme théorique la plus fidèle possible aux données. Historiquement, le premier modèle proposé fut le modèle de Greenshields (évoqué dans la section 1), qui postule une relation linéaire entre vitesse et densité et ainsi une relation parabolique entre débit et densité [55] :

$$q(\rho) = \rho u_f \left(1 - \frac{\rho}{\rho_M} \right). \quad (6)$$

Ce type de modèle, toujours très utilisé en ingénierie du trafic parce qu'il décrit efficacement les bases de la dynamique du flot, se fonde sans doute sur des hypothèses irréalistes. Par exemple, la densité critique ρ_c , qui constitue la frontière entre les régimes fluide et congestionné, serait dans ce cas égale à la moitié de la densité maximale ρ_M (figure 3.1). Or, la réalité des données expérimentales situent plutôt en deçà la densité critique, telle que

$$0.2 \rho_M \leq \rho_c \leq 0.3 \rho_M. \quad (7)$$

La figure 3.1 montre bien le principe général de la relation concave débit/densité : un régime fluide caractérisé par un faible nombre d'interactions entre les véhicules, où le débit croît en fonction de la densité, puis, passé le seuil critique (densité ρ_c), un régime congestionné marqué par davantage d'interactions entre les véhicules et

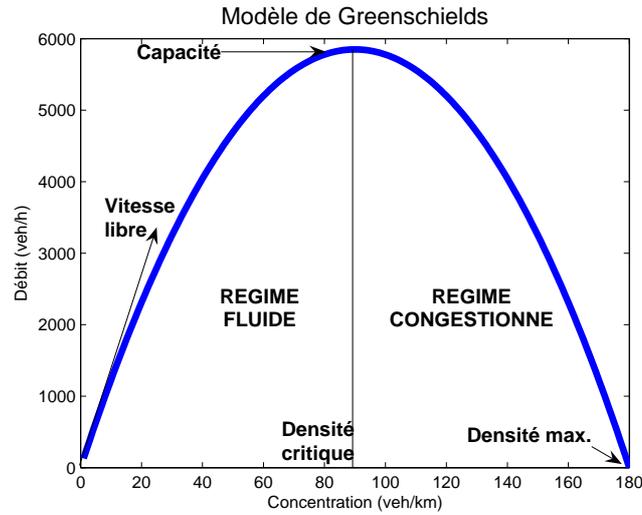


Figure 3.1 – Modèle de Greenschiolds. Relation parabolique débit/densité.

une baisse de débit liée à une augmentation de densité. Parmi les autres formes possibles, outre la relation triangulaire déjà présentée dans la section 1, citons les modèles suivants :

- Greenberg [56] : $q(\rho) = \rho u_f \left(\frac{\rho_M}{\rho} \right)$,
- Underwood [137] : $q(\rho) = \rho u_f \left(\exp\left(\frac{-\rho}{\rho_c}\right) \right)$,
- Newell [109] : $q(\rho) = \rho u_f \left(1 - \exp\left(\frac{-\lambda}{u_f} \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_M}\right) \right)$,
- Papageorgiou [114] : $q(\rho) = \rho u_f \left(\frac{-1}{a} \exp\left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)^a \right)$.

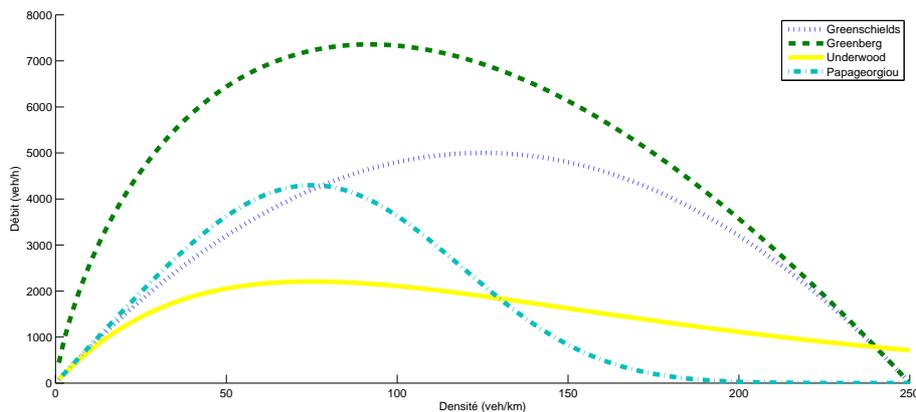


Figure 3.2 – Autres formes du diagramme fondamental

La figure 3.2 montre quatre exemples de formes du diagramme fondamental. Par rapport aux données expérimentales, la difficulté réside dans la partie congestionnée du diagramme, qui se caractérise par une grande dispersion, difficilement assimilable

à telle ou telle loi. De façon générale, le calibrage du diagramme fondamental par rapport aux données relevées sur le site d'études constitue donc une étape incontournable de la modélisation du trafic.

Pour revenir au modèle LWR, notons qu'il peut se résumer à une équation hyperbolique simple

$$\partial_t \rho + (q^{eq})'(\rho) \partial_x \rho = 0. \tag{8}$$

Les solutions données par le modèle LWR sont bien connues. Les perturbations se propagent à la vitesse caractéristique $(q^{eq})'(\rho)$, qui est toujours plus petite que la vitesse du flot (généralement, on considère que $(u^{eq})'(\rho) < 0$). C'est cette condition qui préside au caractère anisotropique du modèle LWR : l'information circule des premiers véhicules, "leaders", vers leurs poursuivants, et non l'inverse. La figure 3.3 montre la nature des ondes dans le cas d'une discontinuité dans les concentrations : cas d'un trafic dense qui rencontre un trafic fluide (cas (a)) et inversement (cas (b)).

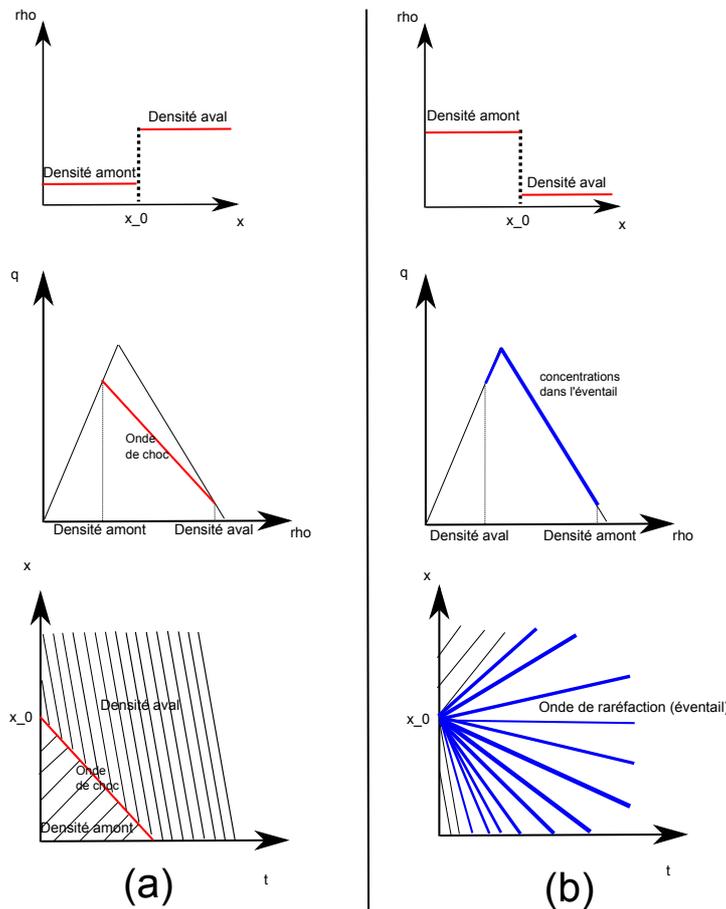


Figure 3.3 – Modèles LWR et discontinuités. (a) cas d'un trafic fluide rencontrant un trafic dense et (b) cas inverse.

Les lignes du plan (x, t) de pente $(q^{eq})'(\rho)$ sont les droites *caractéristiques*, le long desquelles la concentration est constante. Une des méthodes de résolution du modèle, la méthode des caractéristiques, consiste à tracer l'ensemble de ces droites, c'est-à-dire le champ des concentrations, duquel seront déduits les champs de débit et de

vitesse grâce au diagramme fondamental. Pour un problème de type Riemann avec un trafic plus dense en aval qu'en amont, *i.e.* $\rho_{droite} > \rho_{gauche}$, les caractéristiques se croisent et une onde de choc se forme, qui se déplace à la vitesse σ donnée par la relation de saut de Rankine-Hugoniot [53, 126] :

$$\sigma = \frac{q_{gauche} - q_{droite}}{\rho_{gauche} - \rho_{droite}}. \quad (9)$$

Dans le cas inverse, *i.e.* $\rho_{droite} < \rho_{gauche}$ une onde de raréfaction (de type éventail) se forme et le trafic dense se disperse. Ce cas correspond à la situation intuitive où une file de véhicules arrêtée devant un feu rouge redémarre après le passage du feu au vert.

Il est intéressant de remarquer que le diagramme fondamental peut mener au cas

$$q_{gauche} = q_{droite} \text{ pour } \rho_{gauche} \neq \rho_{droite} \quad (10)$$

permettant le développement d'ondes stationnaires. L'unicité des solutions est garantie par le choix des solutions entropiques : il s'agit de ne retenir que les ondes de choc dont la concentration en amont est inférieure à la concentration en aval. Toute discontinuité, pour laquelle la concentration en amont est supérieure à celle en aval donne ainsi naissance à une onde de raréfaction (éventail), qui est dans ce cas une onde d'accélération.

Avant toute critique liée à la forme du diagramme fondamental choisie, c'est bien le postulat de base du modèle LWR qui s'avère le plus critiquable : le système est supposé être toujours à l'équilibre. En d'autres termes, les conducteurs réagiraient instantanément aux changements de conditions. De plus, même si le modèle LWR est capable de traduire assez fidèlement le phénomène de la congestion, il ne semble pas en mesure de reproduire des phénomènes intrinsèques à l'instabilité du trafic, comme des ondes *stop-and-go* par exemple. Cette difficulté a très vite amené des chercheurs à proposer des modèles enrichis d'une équation additionnelle, qui prend la place de l'équation (5) et se montre apte à modéliser des états hors équilibre du système.

Modélisation du deuxième ordre

Les modèles d'ordre supérieur ont été conçus pour rendre compte des états hors équilibre, c'est-à-dire améliorer la description des phases transitoires de l'écoulement. Payne [116] a ainsi développé un modèle du second ordre dans lequel il a introduit un terme d'accélération. L'équation additionnelle de son modèle vise en fait à traduire deux idées majeures :

1. l'anticipation des conducteurs par rapport à ce qu'ils voient devant eux (en aval),
2. et une relaxation vers une vitesse désirée qui dépend du niveau de service.

Le modèle de Payne peut également être vu comme une dérivation des règles de poursuite du modèle de Newell. Dans sa formulation classique, l'équation s'écrit

$$\partial_t u + u \partial_x u = \frac{1}{\tau} (u^{eq}(\rho) - u - \frac{\nu}{\rho} (\partial_x \rho)), \quad (11)$$

où ν est une constante positive et τ un temps de relaxation vers la vitesse d'équilibre. Le terme $\partial_t u + u \partial_x u$ représente une accélération alors que $\frac{u^{eq}(\rho) - u}{\tau}$ est un terme de relaxation vers une vitesse d'équilibre u^{eq} . L'accélération des conducteurs s'adapte en fonction du gradient de la concentration à travers le terme d'anticipation $\frac{\nu}{\rho \tau} (\partial_x \rho)$. Les paramètres τ et ν garantissent le caractère transitoire du modèle, le modèle de Payne se ramenant au modèle LWR en cas d'annulation de ces deux termes.

Le travail de Payne fut le point de départ du développement de plusieurs modèles du second ordre (ou à deux équations), à tel point que l'on se réfère à la famille de modèles de type Payne (*Payne-like models*). Tous les modèles de type Payne peuvent s'écrire sous une même forme générique avec l'équation de conservation $\partial_t \rho + \partial_x \rho u$, plus une équation additionnelle sous la forme

$$\partial_t u + u \partial_x u + \frac{c^2(\rho)}{\rho} \partial_x \rho = \frac{u^{eq}(\rho) - u}{\tau}, \quad (12)$$

où τ est un temps de relaxation vers l'équilibre et c une vitesse du son qui dépend de la concentration. Ces modèles ont fait l'objet d'une grande controverse dans le Landerneau de la modélisation du trafic, déclenchée par le fameux article de Daganzo [33] au titre éloquent : "Requiem for second-order fluid approximations of traffic flow". Les critiques de Daganzo soulignent en particulier le fait que de tels modèles ne respectent pas la nature anisotropique du trafic : les véhicules réagissent essentiellement à ce qui se passe devant eux, l'information ne se déplace que dans une direction. Quant au modèle de type Payne, ils pourraient faire ressortir des vitesses de caractéristiques plus grandes que la vitesse du flot elle-même. Outre le débat récurrent sur l'importance de la vitesse des caractéristiques, qui n'a pas cessé depuis (le lecteur est renvoyé à [64] pour une contribution majeure sur ce thème), force est de constater que les modèles de type Payne possèdent en effet de telles propriétés, qui découlent directement de la structure du système (12), comme l'a montré Zhang en 2002 [147]. En notant le système (12) sous une forme du type

$$\partial_t U + A(U) \partial_x U = S(U), \quad (13)$$

Il découle que

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ u \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} u & \rho \\ c^2(\rho)/\rho & u \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{u^{eq}(\rho) - u}{\tau} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

où A est la matrice jacobienne du flux F pour le système noté sous une forme conservative

$$\partial_t U + \partial_x F(U) \partial_x U = S(U). \quad (15)$$

Les vitesses des caractéristiques sont directement liées aux valeurs propres de A (voir [53] pour plus de détails) et valent

$$\lambda_1 = u + c(\rho) < u - c(\rho) = \lambda_2. \quad (16)$$

Il apparaît donc que la deuxième caractéristique λ_2 voyage plus vite que le trafic car $c(\rho) < 0$, ce qui peut être interprété physiquement par une information venant

des véhicules situés à l'arrière du flot, fait contraire au caractère anisotropique du trafic. De plus, Daganzo souligne dans son article les problèmes liés aux domaines des solutions produites par ce genre de modèles (possibilité de vitesses ou débits négatifs). L'ensemble de ces remarques a mené Rascle [7] à proposer un nouveau modèle pour pallier les défaillances des modèles précédents. L'article original de Aw et Rascle s'intitule d'ailleurs : "Resurrection of second-order models of traffic flow?". Notons qu'au même moment, un modèle similaire était proposé par Zhang [147], ce qui explique que l'on dénomme parfois ce modèle *ARZ*. Afin d'empêcher l'information (les caractéristiques à travers leur vitesse) de voyager plus vite que la vitesse moyenne du flot u , les auteurs introduisent la dérivée particulaire

$$D_t = \partial_t + u\partial_x \quad (17)$$

de la pression, qui mène au système suivant :

$$\partial_t \rho + \partial_x(\rho u) = 0, \quad (18)$$

$$\partial_t(\rho(u + p(\rho))) + u\partial_x(\rho(u + p(\rho))) = \rho \frac{u^{eq}(\rho) - u}{\tau}. \quad (19)$$

Avec un bon choix du terme de pression [7], le modèle de Aw-Rascle corrige les principaux défauts des précédents modèles à plusieurs équations. Le modèle reproduit les aspects essentiels de la dynamique du trafic (ondes *stop-and-go* par exemple). Les propriétés et qualités de ce type de modèle vont fortement dépendre du choix du terme de pression. Rascle suggère de considérer le prototype des fonctions p comme suit :

$$p(\rho) = \rho^\gamma, \quad (20)$$

avec $\gamma > 0$. En réécrivant le système sous une forme conservative, il apparaît deux valeurs propres $\lambda_1 = u - \rho p'(\rho) \leq \lambda_2 = u$, le système étant donc strictement hyperbolique, sauf pour $\rho = 0$. La structure du système fait que la vitesse de propagation de n'importe quelle onde n'excèdera pas la vitesse u : "l'information" ne voyagera ainsi pas plus vite que les véhicules eux-mêmes. D'après la théorie des systèmes hyperboliques [53], la première valeur propre λ_1 est vraiment non linéaire, les ondes associées seront donc des 1-ondes qui seront soit des ondes de chocs (qui vont correspondre à des freinages) ou de raréfaction (accélérations). À l'opposé de la première valeur propre, λ_2 est linéairement dégénérée et les ondes associées seront des 2-ondes correspondant à des discontinuités de contact. Les auteurs montrent les bonnes propriétés du modèle, en particulier l'existence de solutions qui restent dans un domaine invariant physiquement admissible [7]. La proposition de Aw et Rascle a entraîné un certain nombre d'analyses et d'extensions (citons, parmi d'autres, [10, 11, 52, 92]). La modélisation continue du premier et deuxième ordre a un lien clair avec les modèles de poursuite microscopiques, desquels il peuvent être dérivés [8]. De plus, ils sont liés à une autre échelle de modélisation, souvent nommée mésoscopique, qui peut faire le lien entre les niveaux microscopique et macroscopique [135].

3.2.3 Modélisation mésoscopique ou cinétique

Entre les niveaux microscopiques et macroscopiques se situe une représentation intermédiaire qui manie des fonctions de distribution représentant la dynamique de groupes de véhicules. Ce niveau de représentation est souvent dénommé mésoscopique, ou cinétique en modélisation du trafic. Ce terme a également été utilisé dans le chapitre 2, par analogie, pour désigner notre analyse des pelotons de véhicules. À l'échelle mésoscopique, les approches dérivées de la théorie cinétique des gaz décrivent l'évolution de fonctions de densité de probabilité des principales variables du trafic. Des modèles cinétiques de type Boltzmann ont été élaborés par Prigogine et Andrews dès les années 60 [121,122]. Ils introduisent également des termes prenant en compte l'accélération ou la décélération du point de vue de la physique statistique. Ces modèles présentent la particularité de pouvoir être aussi bien dérivés de modèles microscopiques que de pouvoir servir eux-mêmes de point de départ à la dérivation d'équations macroscopiques ou microscopiques. Au sein de cette famille de modèles, l'évolution en temps de la probabilité $f(x, v, t)$ d'avoir des véhicules à la vitesse v au temps t en la position x suit une équation de type Boltzmann :

$$\partial_t f + v \partial_x f = (\partial_t f)_{rel.} + (\partial_t f)_{int.} . \quad (21)$$

Le terme $(\partial_t f)_{rel.}$ exprime une relaxation vers une fonction de distribution idéale (pour reprendre les termes de Prigogine et Andrews), ou d'équilibre, $f^{eq}(x, v)$, qui correspondrait à la distribution pour laquelle aucune interaction n'interviendrait entre les conducteurs (système infiniment dilué). En introduisant une probabilité de dépassement P et un temps de relaxation τ , les auteurs proposent la forme

$$(\partial_t f)_{rel.} = \frac{-(f - f^{eq})P}{\tau(1 - P)}. \quad (22)$$

Si $f > f^{eq}$, l'équation (22) doit assurer que les véhicules roulant au dessus de la vitesse désirée puissent doubler et retrouver la vitesse d'équilibre, ramenant ainsi f vers f^{eq} . Dans le cas contraire, les véhicules pourront accélérer, de sorte à retrouver la distribution d'équilibre. Le terme d'interaction, en reprenant les notations précédentes des densités et vitesses moyennes ρ et u , est quant à lui défini de la façon suivante :

$$(\partial_t f)_{int.} = f\rho(u - v)(1 - P). \quad (23)$$

Ce terme traduit une intégration à partir de termes de type Boltzmann des modèles de poursuite fondés sur le comportement des conducteurs (interactions entre véhicules rapides et lents et probabilités de dépassement). Bien que séduisant d'un point de vue théorique, les faiblesses du modèle original de Prigogine ont été assez vite pointées, notamment sa difficulté à bien correspondre aux données empiriques. Paveri et Fontana [115] ont amélioré le modèle en introduisant une vitesse individuelle désirée, et, d'une façon générale, les recherches se sont focalisées sur la question de la fonction de distribution. On trouvera un état de l'art complet sur ce sujet dans [65].

Il y a une décennie, Klar et Wegener [83,84] ont construit un modèle cinétique dérivé des modèles microscopiques de poursuite (modèles *follow the leader*). En partant de la formulation de Enskog pour un gaz dense, les auteurs dérivent un

modèle cinétique de type Boltzmann avec un coefficient d'anticipation d'Enskog. Pour des conditions homogènes, il existe une fonction de densité de probabilité d'équilibre qui prendra mieux en compte le caractère stochastique du flot. À partir du modèle de Klar-Wegener, il est possible de dériver des équations macroscopiques se rapprochant d'un modèle à deux équations de type Payne :

$$\partial_t \rho + \partial_x(\rho u) = 0, \quad (24)$$

$$\partial_t(\rho u) + \partial_x(\rho u^2 + p_e(\rho)) + a_e(\rho)\partial_x \rho = \rho \frac{u_e(\rho) - u}{T_e(\rho)}. \quad (25)$$

où ρ est la densité de véhicules et u la vitesse moyenne. Les fonctions $u_e(\rho)$, $p_e(\rho)$, $T_e(\rho)$ et $a_e(\rho)$ correspondent aux conditions d'équilibre du flot et dénotent respectivement la vitesse d'équilibre, la pression à l'équilibre, un temps de relaxation caractéristique vers l'équilibre et le terme d'anticipation de type Enskog. Le temps de relaxation $T_e(\rho)$ représente l'inverse d'une fréquence d'interaction moyenne dans le trafic. Toutes ces quantités peuvent être dérivées de formes intégrales en impliquant la distribution d'équilibre $f_e(\rho, v)$ où $v \in [0, u_f]$ représente une vitesse microscopique véhiculaire bornée par la vitesse libre u_f . En particulier, la densité, le débit et la pression à l'équilibre viennent des trois premiers moments de f_e :

$$(\rho, \rho u_e(\rho), p_e(\rho))^t = \int_0^{u_f} (1, v, (v - u_e(\rho))^2)^t f_e(\rho, v) dv. \quad (26)$$

En comparaison avec un modèle cinétique entièrement fondé sur une équation de Boltzmann, le modèle macroscopique (24) et (25) peut être préféré, notamment parce qu'il bénéficie d'une mise en oeuvre facile et rapide. Par ailleurs, des efforts se sont portés au cours de la dernière décennie sur les manières de montrer comment les modèles de trafic macroscopiques pouvaient être dérivés d'équations cinétiques. En particulier, Illner *et al.* [73] ont prouvé que le modèle Aw-Rascle (18) et (19) pouvait se déduire d'équations cinétiques de type Fokker-Planck de la forme

$$\partial_t f + v \partial_x f + \partial_v (B[f](\rho, u, v - u) f - D_\varepsilon[f](\rho, u, v - u) \partial_v f) = 0 \quad (27)$$

où $B[f]$ est une force de freinage/accélération et D_ε un terme de diffusion. Le terme $B[f]$ va dépendre de la vitesse relative du conducteur par rapport à la vitesse moyenne et d'une distance de sécurité appropriée. Si le conducteur voit devant lui un flot circulant à une vitesse plus faible, il freine, et inversement. De plus, les auteurs introduisent dans leur travail une probabilité de changement de voie qui intervient en cas de freinage. En négligeant quelques termes dans la formulation Fokker-Planck, en particulier des termes de diffusion, les auteurs dérivent le modèle de Aw-Rascle [73]. Par la méthode des moments, et selon le choix des fermetures, il est ainsi possible de dériver des modèles fluides macroscopiques de formulations cinétiques. Enfin, pour conclure cette partie, mentionnons un ensemble de travaux visant à développer un cadre de modélisation cinétique mathématique du trafic, capable de modéliser une grande variété de phénomènes avec un effort particulier porté sur les phénomènes de congestion [29, 36–38, 66].

3.2.4 Conclusion et contexte du travail de recherche présenté

Comportements microscopiques des véhicules individuels décrits par des lois de poursuite ou des automates cellulaires, distributions de véhicules à une certaine vitesse selon des formulations de la cinétique des gaz ou de la physique statistique, lois macroscopiques du flot de véhicules à travers des modèles de la mécanique des fluides : la théorie du trafic propose plusieurs niveaux de représentation auxquels viennent se greffer des familles de modèles venant de disciplines académiques variées. En cela, elle constitue un terrain applicatif particulièrement adapté aux problèmes d'échelles et aux éventuelles passerelles entre les différentes approches résumées dans ce début de chapitre (figure 3.4).

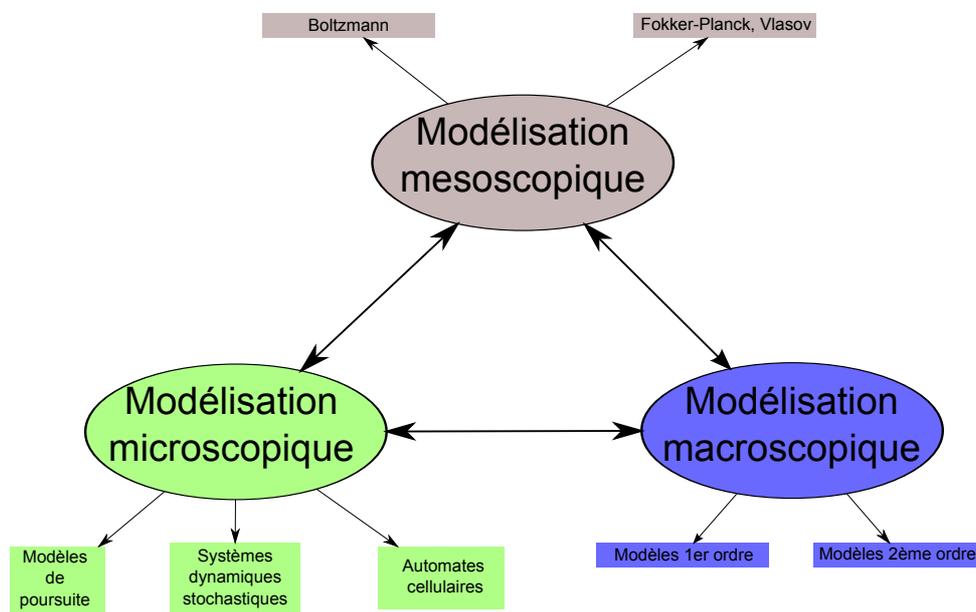


Figure 3.4 – La modélisation du trafic. Des niveaux de modélisation communiquants.

Après une période de foisonnement des recherches dans chacun des domaines évoqués, la porosité des différents niveaux de modélisation est vite apparue et les liens entre modèles micro-, méso- et macroscopiques ont été peu à peu établis : liens entre modèles macroscopiques fluides et modèles microscopiques, dérivation de modèles micro- ou macro- à partir de formulation cinétique, etc. Notre synthèse des modèles de trafic n'est pas exhaustive et il est certain qu'un certain nombre d'améliorations ont été apportées aux modèles présentés. En particulier, la sophistication de ces modèles s'est traduite par l'intégration d'aspects propres à la physique du trafic : hétérogénéité du trafic (modèles multi-classes), multiplicité des voies (modèles multi-voies) [69], ou autres aspects stochastiques.

Dès lors, quel niveau de modélisation choisir ? Chacun présente ces avantages et inconvénients et postule des hypothèses particulières. Les modèles microscopiques reposent sur des hypothèses simples du comportement du conducteur. On peut leur reprocher de ne pas prendre en compte la psychologie et la variété des comportements

des usagers, qui sont loin de se comporter comme des particules répondant à de simples *stimuli*. De plus, leur application à des réseaux de grande taille semble être une limite handicapante. Notre travail de modélisation se portera donc plutôt sur les modèles macroscopiques qui sont aujourd'hui les plus utilisés dans les applications de gestion du trafic. Ils peuvent bien décrire la dynamique du flot et servir d'aide à la décision dans la prévision des temps de parcours ou de la congestion. On peut, bien sûr, leur opposer le gommage des comportements individuels et la grossièreté de l'analogie avec les fluides. Mais une polémique supplémentaire se situe, nous l'avons évoqué, à l'intérieur de cette famille avec les modèles du premier ordre et ceux plus sophistiqués à deux équations, nommés plus généralement du deuxième ordre. D'un côté, les modèles du premier ordre reposent sur l'hypothèse forte d'un équilibre permanent du système. Toutefois, leur simplicité et leur bon comportement face aux données leur vaut une popularité non usurpée. L'intégration de l'impact de la météorologie se traduirait ici par un diagramme fondamental "météo-sensible" qui s'adapterait aux changements météorologiques. D'un autre côté, il est tout à fait légitime, plutôt que de se fonder sur l'équilibre de la vitesse, d'ajouter une équation exprimant l'accélération du flux et décrivant des états hors de l'équilibre. Cette complexité entraîne l'apparition de nouvelles contraintes par rapport à la physique du trafic et mène à de nouvelles hypothèses empiriques. Cependant, une formulation à plusieurs équations peut amener de la richesse, notamment avec les termes de retour à l'équilibre qui peuvent être un bon cadre d'intégration de l'incertitude, cristallisée ici par les effets météorologiques. Outre une meilleure adéquation aux données de telle ou telle approche pour un cas applicatif précis, il ne semble pas y avoir de juge de paix pour trancher sur la question. Point commun à ces deux approches, la vitesse du flot, qui sera notée u , est par définition la même pour l'ensemble des véhicules. À l'inverse de cet invariant aux niveaux micro- et macroscopique, une autre approche consiste à considérer des distributions de véhicules ayant une certaine vitesse v au temps t à la position x . L'intérêt de ce niveau mésoscopique de modélisation, nommé aussi cinétique, réside dans une granularité intermédiaire, ses limites dans la forme empirique à donner à ce genre de distributions et son adéquation aux données. Pourtant, si une formulation de type cinétique n'est pas directement manipulable pour une confrontation à des cas réels, elle n'en demeure pas moins un point de départ naturel à la dérivation d'équations macroscopiques d'ordre quelconque. C'est bien dans ce cadre que le travail de modélisation présenté se situera. Un formalisme cinétique de type Vlasov ouvrira la voie à une hiérarchie de modèles. Puis, à partir de cette formulation originale, le travail se concentrera sur les modèles macroscopiques qui peuvent en être déduits. Sans se priver de la complémentarité des deux approches, la fermeture de certains termes et l'intégration des équations par la méthode des moments mèneront aussi bien à un modèle original à deux équations qu'au modèle classique du premier ordre LWR, selon les hypothèses avancées. À travers le prisme de ces différentes dérivations, l'intégration du phénomène météorologique pourra finalement être détaillée dans une dernière section.

3.3 Contribution à la modélisation du 2ème ordre

Dans cette section, nous proposons un nouveau modèle du second ordre, qui est dérivé d'une formulation générale non linéaire de type Vlasov. Dans un premier temps, nous évoquerons quelques fondements de la formulation Vlasov avant d'aborder son application au trafic routier. Ensuite, nous détaillerons les fermetures de certains termes clés (accélération, relaxation), car elles permettent en partie la dérivation d'équations macroscopiques à partir de la formulation originale Vlasov, par la méthode des moments. Un nouveau système à deux équations macroscopiques sera ainsi dérivé, dont les propriétés générales seront présentées. Parmi elles, on retiendra des conditions de stabilité particulières selon la forme donnée au terme source de relaxation, mises en exergue par une analyse de stabilité linéaire. Le modèle macroscopique résultant sera couplé à une équation de transport sur les temps intervéhiculaires, introduite afin de modéliser par la suite certains des résultats présentés dans le chapitre 2. Ce dernier point fera ainsi la liaison avec l'intégration des effets météorologiques dans les modèles qui sera détaillée dans une section à part.

3.3.1 Formulation générale Vlasov

Origine de la formulation Vlasov : théorème de Reynolds

Le théorème de Reynolds régit l'évolution d'une quantité q au cours du temps au sein d'un volume v_t de l'espace physique. Considérant le transport d'un flot à la vitesse $\frac{\partial x}{\partial t} = u$, le théorème se formule

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{v_t} q(x, t) = \int_{v_t} \{ \partial_t q + \partial_x u q \} dx = \int_{v_t} S dx \quad (28)$$

Pour un volume infinitésimal v_t , $|v_t| \rightarrow 0$, on retrouve l'équation de conservation $\partial_t q + \partial_x (uq) = S$.

La formulation cinétique de type Vlasov se fonde sur une généralisation du théorème de Reynolds dans l'espace (x, v) , aussi appelé espace des phases.

On introduit la vitesse $v = \frac{dx}{dt}$ et l'accélération $a(v, x) = \frac{dv}{dt}$. En notant $X = \begin{pmatrix} x \\ v \end{pmatrix}$ et $U = \begin{pmatrix} v \\ a \end{pmatrix}$, on a bien $\frac{\partial X}{\partial t} = U$. Pour un volume v_t se déplaçant dans l'espace X selon U , le théorème de Reynolds donne

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \int_{v_t} q dx dv = \int \int_{v_t} \{ \partial_t q + \nabla_{(x,v)} \cdot (Uq) \} dx dv = \int \int_{v_t} S dx dv \quad (29)$$

Pour un volume infinitésimal $v(t) \rightarrow 0$ et en remplaçant q par une quantité f , on obtient

$$\partial_t f + \nabla_{(x,v)} \cdot \left(\begin{pmatrix} v \\ a \end{pmatrix} f \right) = S, \quad (30)$$

soit

$$\partial_t f + \frac{\partial}{\partial x} (vf) + \frac{\partial}{\partial v} (af) = S. \quad (31)$$

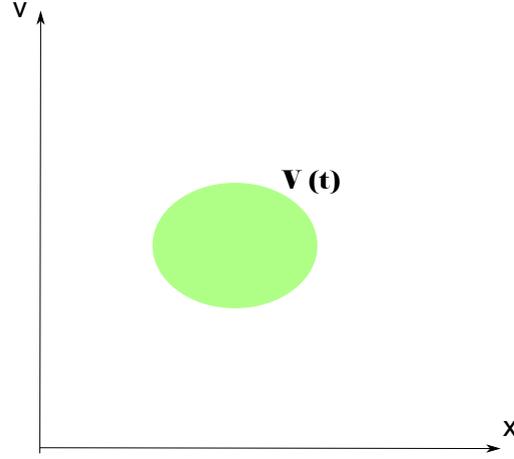


Figure 3.5 – Volume se déplaçant au cours du temps dans l'espace des phases

Formulation Vlasov pour le trafic routier

Les équations macroscopiques du trafic routier seront dérivées de la formulation cinétique Vlasov suivante :

$$\partial_t f + \partial_x(vf) + \partial_v(a(v, f, \partial_x f)f) = \eta(f) (f^{eq} - f), \quad (32)$$

où $f = f(x, v, t)$ représente la densité de véhicules ayant la vitesse individuelle v , à la position x , au temps t , et où $f^{eq} = f^{eq}(x, v, t)$ est une distribution d'équilibre. La quantité $\eta(f) \geq 0$ est un taux de relaxation vers l'équilibre, qui peut éventuellement dépendre de f via ses moments d'ordre 0 et 1. Le terme $a(v, f, \partial_x f)f$ représente quant à lui un terme d'accélération/freinage des véhicules. Par la suite, nous posons

$$(1, v, v^2, a)f \in \mathcal{C}^0[0, \infty) \cap L^1(0, \infty), \quad (1, v)f^{eq} \in \mathcal{C}^0[0, \infty) \cap L^1(0, \infty).$$

La variable de densité ρ est définie comme le moment d'ordre zéro de la distribution f et le débit q comme le moment d'ordre 1 :

$$(\rho, q) = \int_0^\infty (1, v) f(v) dv. \quad (33)$$

La vitesse moyenne u est définie comme

$$u = \frac{q}{\rho} = \frac{\int_0^\infty v f(v) dv}{\int_0^\infty f(v) dv}.$$

Selon la physique du trafic, il est attendu que la variable de densité ρ appartienne à l'intervalle $(0, \rho_M]$ où ρ_M symbolise la densité maximale (*jam density*). La vitesse

moyenne u varie quant à elle de 0 à une valeur de vitesse maximale correspondant à la vitesse libre, notée u_f .

Diagramme fondamental et distribution d'équilibre f

Comme nous l'avons montré précédemment, on obtient traditionnellement de l'analyse des données trafic le diagramme fondamental qui relie la densité ρ et le débit q^{eq} , ou de façon équivalente la densité avec la vitesse moyenne d'équilibre u^{eq} , sous des considérations du système à l'équilibre (voir par exemple [16]). On peut utiliser $q^{eq}(\rho)$ ou $u^{eq}(\rho)$ selon la formule de compatibilité $q^{eq}(\rho) = \rho u^{eq}(\rho)$. Par exemple, la loi triangulaire [16] définit la vitesse d'équilibre comme une fonction linéaire par morceaux de la densité

$$u^{eq}(\rho) = u_f \min \left(1, \frac{(\rho - \rho_M)\rho_c}{(\rho_c - \rho_M)\rho} \right), \quad \rho \in [0, \rho_M] \quad (34)$$

où $\rho_c \in (0, \rho_M)$ est rappelée être la densité critique séparant les états fluides et congestionnés du trafic. De façon générale, la vitesse d'équilibre $u^{eq}(\rho)$ est définie telle que

$$(u^{eq})'(\rho) \leq 0 \quad \forall \rho \in [0, \rho_M] \quad (35)$$

exprimant une perte de vitesse au fur et à mesure que la densité augmente. Par la suite, la condition (35) sera toujours vérifiée.

Par rapport à la distribution d'équilibre $f^{eq}(x, v, t)$, il pourrait être possible d'utiliser des outils statistiques afin de déterminer quelle loi correspondrait le mieux aux données empiriques. Pour le moment, nous supposons que $\int_0^\infty f^{eq}(v) dv = \rho$ signifiant que la distribution locale f et la distribution d'équilibre f^{eq} partagent les mêmes moments d'ordre 0. Nous posons également que le premier moment de la distribution d'équilibre f^{eq} est compatible avec la vitesse d'équilibre donnée par le diagramme fondamental $\rho \mapsto u^{eq}(\rho)$, à savoir

$$u^{eq}(\rho) = \frac{1}{\rho} \int_0^\infty v f^{eq}(v) dv. \quad (36)$$

Une fermeture pour f^{eq} serait par exemple d'assumer sa dépendance en (x, t) en moyennant sur le moment d'ordre zéro de f seulement : $f^{eq}(v; x, t) = f^{eq}(v; \rho(x, t))$.

3.3.2 Fermetures des termes d'accélération et de relaxation

Fermeture empirique du terme d'accélération

Le terme d'accélération traduit le comportement d'accélération/freinage des conducteurs et, ainsi, leur réaction par rapport au flot de véhicules situé en amont. Le manque de connaissances sur ce phénomène intrinsèquement lié à la nature stochastique du comportement des conducteurs conduit à proposer une fermeture de nature

forcément empirique. En intégrant l'équation (32) en v sur $(0, \infty)$ nous obtenons après intégration par parties

$$\partial_t \rho + \partial_x q + [a(v, f, \partial_x f) f]|_{v=0} = 0. \quad (37)$$

Afin d'obtenir l'équation de conservation de la masse $\partial_t \rho + \partial_x q = 0$ qui exprime la conservation des véhicules sur une voie sans entrées/sorties, la contrainte suivante doit être imposée :

$$\lim_{v \rightarrow 0} a(v, f, \partial_x f) f(v) = 0. \quad (38)$$

On considère ensuite que le comportement du conducteur est directement lié à la variation spatiale de la vitesse moyenne $\partial_x u$: si $\partial_x u > 0$ (resp. si $\partial_x u < 0$), alors le conducteur accélère afin d'adapter sa propre vitesse à celle du flot devant lui. Par conséquent, $a(v, f, \partial_x f)$ est considéré comme étant proportionnel à $\partial_x u$.

D'autre part, une manière simple de garantir la propriété (38) est de rendre le terme d'accélération proportionnel à v . Il est de plus supposé que le terme d'accélération est proportionnel à la distance inter-véhiculaire moyenne, linéairement dépendante de la quantité ρ^{-1} . Ainsi, on ferme le terme d'accélération de la façon suivante :

$$a(v, f, \partial_x f) = v \frac{\rho_0}{\rho} \partial_x u, \quad (39)$$

de sorte que $\rho_0 > 0$ est une constante qui a la dimension d'une densité (veh/km). Le choix de ρ_0 sera explicité plus tard.

Fermeture du terme source

En ce qui concerne le terme source, nous lui associerons une forme à trois paramètres pour la fonction de relaxation $\eta(f)$:

$$\eta(f) = \eta(\rho, u; \ell, \delta, \alpha) = \left(\frac{|u^{eq}(\rho) - u|}{\ell(\rho)} \right)^\alpha \left(\frac{1}{\delta(\rho)} \right)^{1-\alpha}, \quad (40)$$

où $\ell(\rho)$ est une fonction de longueur caractéristique, $\delta(\rho)$ une fonction de temps caractéristique et $\alpha \in [0, 1]$. La fonction η a la dimension de l'inverse d'un temps. De plus, nous posons que $\ell(\rho)$ et $\delta(\rho)$ sont toutes les deux des fonctions de classe C^∞ , strictement positives, décroissantes de ρ avec

$$\lim_{\rho \rightarrow \rho_M} \{\ell(\rho), \delta(\rho)\} = 0. \quad (41)$$

La condition (41) impose que l'équilibre est immédiatement atteint en cas de congestion (bouchon de véhicules). Cette considération physique semble raisonnable du fait que les aspects stochastiques pourraient raisonnablement se gommer dans le cas d'un bouchon où tous les véhicules tendraient à s'arrêter, l'équilibre du système étant alors immédiatement atteint.

Pour $\alpha = 0$, le terme source est un terme classique de relaxation vers la distribution d'équilibre

$$\frac{f^{eq}(v; \cdot) - f(v; \cdot)}{\delta(\rho)}$$

tandis que pour $\alpha = 1$, il devient

$$\frac{|u^{eq}(\rho) - u|}{\ell(\rho)} (f^{eq}(v; \cdot) - f(v; \cdot)),$$

c'est-à-dire un terme de relaxation à un taux impliquant la vitesse hors équilibre elle-même. Le terme de retour linéaire à l'équilibre est ainsi transformé, pour $\alpha = 1$, en un terme quadratique avec une longueur caractéristique de retour à la vitesse d'équilibre.

3.3.3 Dérivation des équations macroscopiques

Pour la fermeture du terme d'accélération, nous avons montré que l'intégration de l'équation (32) en v sur $(0, \infty)$ imposait une condition sur a pour garantir l'équation de conservation des véhicules. Cette intégration de (32) constitue la première étape de la méthode des moments qui permet de dériver les équations macroscopiques à partir de l'équation Vlasov de départ. Les hypothèses précédentes donnent ainsi, d'ores et déjà, l'équation de conservation

$$\partial_t \rho + \partial_x q = 0, \quad (42)$$

avec $q = \rho u$. Afin de fermer le système, il faut une équation additionnelle sur q . En multipliant l'équation (32) par v puis en intégrant sur $(0, \infty)$, on obtient

$$\partial_t q + \partial_x \int_0^\infty v^2 f dv + \int_0^\infty v \partial_v [a(v, f, \partial_x f) f] dv = \eta(\rho, u) (q^{eq}(\rho) - q).$$

En intégrant par partie et en se servant de (38), on a

$$A = \int_0^\infty v \partial_v [a f] dv = - \int_0^\infty a(v, f, \partial_x f) f(v) dv.$$

En introduisant la forme (39) du terme d'accélération, on obtient

$$A = -\frac{\rho_0}{\rho} \partial_x u \int_0^\infty v f(v) dv = -\frac{\rho_0}{\rho} (\partial_x u) q = -\partial_x \left(\rho_0 \frac{u^2}{2} \right).$$

Pour la suite, on introduit une variable de pression

$$p = \int_0^\infty (v - u)^2 f dv \quad (43)$$

qui agit comme une force due aux fluctuations de la vitesse des véhicules.

Une équation sur les moments est obtenue, que nous présentons ici sous une forme conservative :

$$\partial_t q + \partial_x (qu) - \partial_x \left(\frac{1}{2} \rho_0 u^2 \right) + \partial_x p = \eta(\rho, u) (q^{eq}(\rho) - q). \quad (44)$$

À présent, une fermeture est requise pour le terme de pression. Une solution est de considérer une pression constante en espace, c'est-à-dire une énergie de fluctuations des vitesses constante. Cette hypothèse est également faite par Illner *et al.* [73] pour dériver le modèle de Aw-Rascle d'une formulation de type Vlasov. Dans ce cas, $\partial_x p = 0$ et le modèle de trafic du second ordre résultant est

$$\partial_t \rho + \partial_x(\rho u) = 0, \quad (45)$$

$$\partial_t(\rho u) + \partial_x(\rho u^2) - \partial_x\left(\frac{1}{2}\rho_0 u^2\right) = \rho \eta(\rho, u) (u^{eq}(\rho) - u). \quad (46)$$

3.3.4 Propriétés du système et analyse de stabilité linéaire

Structure du système

Le système de lois de conservation est écrit dans la forme vectorielle

$$\partial_t U + \partial_x F(U) = S(U), \quad (47)$$

avec $U = (\rho, \rho u)$. L'espace admissible pour ce système est $\Omega^{ad} = \{U = (\rho, \rho u), \rho \in (0, \rho_M], u \in [0, u_f]\}$. En introduisant $\tau = \rho^{-1}$, le système peut être réécrit

$$\partial_t \tau + u \partial_x \tau - \tau \partial_x u = 0, \quad (48)$$

$$\partial_t u + (1 - \rho_0 \tau) u \partial_x u = \eta(\rho, u) (u^{eq}(\rho) - u). \quad (49)$$

c'est-à-dire dans une forme quasilinéaire $\partial_t W + A(W) \partial_x W = S(W)$ où $W = (\tau, u)$ est le vecteur des variables primitives. Pour la suite, nous noterons par $c = c(\tau, u)$ la quantité

$$c = \rho_0 \tau u \geq 0, \quad (50)$$

qui peut être vue comme une vitesse d'anticipation. Les valeurs propres du système sont

$$\lambda_1(W) = u - c(\tau, u) \text{ et } \lambda_2(W) = u, \quad (51)$$

pour $U \in \Omega^{ad}$, $c \geq 0$ et $\lambda_1(W) \leq \lambda_2(W)$. Les deux valeurs propres sont distinctes, sauf pour le cas particulier $u = 0$. Ainsi, sur l'espace admissible restreint $\Omega^{ad,*} = \{U = (\rho, \rho u), \rho \in (0, \rho_M], u \in (0, u_f]\}$, le système homogène est strictement hyperbolique. Les vecteurs propres respectifs sont $r_1(W) = (\tau, c)^T$ et $r_2(W) = (1, 0)^T$. Dès lors,

$$\nabla_w \lambda_2(W) \cdot r_2 = 0 \quad \forall U \in \Omega^{ad,*}, \quad (52)$$

de telle sorte que λ_2 est linéairement dégénérée. Pour le champ 1, nous avons

$$\nabla_w \lambda_1(W) \cdot r_1(W) = -(\rho_0 \tau)^2 u \quad (53)$$

et λ_1 est vraiment non linéaire (VNL) sur $\Omega^{ad,*}$. Grâce à la théorie des systèmes hyperboliques de lois de conservation [53], on peut ensuite savoir que, au moins pour des données de faible amplitude, les solutions entropiques du problème de Riemann existent. Elles seront faites de 3 états constants séparés par une 1-onde qui est soit une onde de choc, soit une onde de raréfaction, et par une 2-discontinuité

de contact. Une discontinuité de contact est une interface qui sépare deux régions différentes du trafic. La nature des valeurs propres, qui n'excèdent jamais la vitesse du flot, montrent, qu'à l'instar du modèle *ARZ* proposé par Aw-Rascle et Zhang, le modèle macroscopique introduit obtenu le caractère anisotropique du trafic.

Analyse de stabilité linéaire du système inhomogène

Nous séparons ici l'analyse de stabilité linéaire en deux parties, selon deux formes du terme de relaxation, qui correspondent au choix de $\alpha = 0$ et $\alpha = 1$. De manière générale, les travaux présentés par la suite opteront également pour une de ces deux formes.

Cas d'un terme source de relaxation avec $\alpha = 0$

Ce cas correspond à $\eta = \delta^{-1}$. Nous considérons des solutions perturbées par une onde plane $\rho = \rho^0 + \tilde{\rho}$, $u = u^0 + \tilde{u}$ du système linéarisé vers un état constant d'équilibre (ρ^0, u^0) , $u^0 = u^{eq}(\rho^0)$:

$$\partial_t \tilde{\rho} + u^0 \partial_x \tilde{\rho} + \rho^0 \partial_x \tilde{u} = 0, \quad (54)$$

$$\partial_t \tilde{u} + \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho^0}\right) u^0 \partial_x \tilde{u} = \frac{(u^{eq})'(\rho^0) \tilde{\rho} - \tilde{u}}{\delta(\rho^0)}. \quad (55)$$

Nous cherchons donc des solutions de la forme

$$\tilde{\rho} = \tilde{\rho}^0 e^{ikx + \lambda t}, \quad (56)$$

$$\tilde{u} = \tilde{u}^0 e^{ikx + \lambda t}. \quad (57)$$

où k est un nombre d'onde et $\lambda \in \mathbb{C}$. Plusieurs cas peuvent se présenter selon la forme de $Re(\lambda)$:

- Si $Re(\lambda) > 0$, les ondes planes vont grandir au cours du temps,
- Si $Re(\lambda) < 0$, alors les perturbations vont exponentiellement s'estomper,
- Si $Re(\lambda) = 0$, alors (ρ^0, u^0) sera un centre de solutions périodiques [32].

Par souci de simplicité, nous notons $r = \rho_0/\rho^0 > 0$, $\delta = \delta(\rho^0)$ et $\gamma = (u^{eq})'(\rho^0)$. Remarquons que $\gamma \leq 0$ à cause de l'hypothèse initiale (35). En insérant (56),(57) dans (16),(55), nous obtenons le problème aux valeurs propres suivant :

$$\begin{pmatrix} ik u^0 & ik \rho^0 \\ -\gamma \delta^{-1} & ik(1-r)u^0 + \delta^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\rho}^0 \\ \tilde{u}^0 \end{pmatrix} = -\lambda \begin{pmatrix} \tilde{\rho}^0 \\ \tilde{u}^0 \end{pmatrix}. \quad (58)$$

Le polynôme caractéristique de ce système s'écrit

$$P(\lambda) = \lambda^2 + \lambda[ik(2-r)u^0 + \delta^{-1}] - k^2(u^0)^2(1-r) + ik\delta^{-1}(u^0 + \rho^0\gamma).$$

Le discriminant Δ de ce polynôme de degré 2 est $\Delta = (iku^0r - \delta^{-1})^2 - 4ik\rho^0\gamma\delta^{-1}$. Les racines de ce déterminant doivent être analysées. Pour un nombre complexe

quelconque z de la forme $z = A + iB$, les racines sont données par la formule

$$\sqrt{z} = \sqrt{\frac{\sqrt{A^2 + B^2} + A}{2}} + i \operatorname{sgn}(B) \sqrt{\frac{\sqrt{A^2 + B^2} - A}{2}}. \quad (59)$$

Ici, nous avons

$$A = \delta^{-2} - k^2(u^0)^2 r^2, \quad B = -2k\delta^{-1}(u^0 r + 2\rho^0 \gamma). \quad (60)$$

Pour l'analyse de stabilité linéaire, nous avons vu que seule la partie réelle des racines du polynôme λ^\pm peut être considérée. À partir de la formule (59), il découle

$$\operatorname{Re}(\lambda^\pm) = \frac{1}{2} \left\{ -\delta^{-1} \pm \sqrt{\frac{\sqrt{A^2 + B^2} + A}{2}} \right\}. \quad (61)$$

avec A et B donnés (60). Le système est linéairement stable si et seulement si $\operatorname{Re}(\lambda^-), \operatorname{Re}(\lambda^+) \leq 0$ pour un nombre d'onde k quelconque. Pour tout $\delta > 0$, il est clair que $\operatorname{Re}(\lambda^-) < 0$. La condition nécessaire et suffisante pour $\operatorname{Re}(\lambda^+)$ d'être négatif est

$$\sqrt{\frac{\sqrt{A^2 + B^2} + A}{2}} \leq \delta^{-1}.$$

Un développement direct donne la condition

$$\rho^0 \gamma^2 + \gamma u^0 r \leq 0, \quad (62)$$

ou, alternativement (rappelons que $\gamma < 0$),

$$\rho^0 \gamma + u^0 \frac{\rho_0}{\rho^0} \geq 0. \quad (63)$$

Cette condition est indépendante du nombre d'onde k mais également du temps de relaxation δ . À partir de la définition u^0 et γ , nous obtenons la condition de stabilité linéaire suivante, qui dépend de la loi du diagramme fondamental $u^{eq}(\rho)$ et du paramètre ρ^0 :

$$-(\rho^0)^2 (u^{eq})'(\rho^0) \leq \rho_0 u^{eq}(\rho^0). \quad (64)$$

Pour résumer, le théorème suivant est énoncé :

Théorème 3.3.1. *Le système (48), (49) avec $\alpha = 0$ est conditionnellement linéairement stable selon le choix de la constante ρ_0 . La condition nécessaire et suffisante pour une stabilité linéaire vers un état constant d'équilibre $(\rho, u^{eq}(\rho))$ est*

$$-\rho^2 (u^{eq})'(\rho) \leq \rho_0 u^{eq}(\rho). \quad (65)$$

Par exemple, une condition suffisante pour (ρ, u) de respecter (49) consiste à satisfaire

$$-\rho^2 (u^{eq})'(\rho) \leq \left(\frac{\rho}{\rho_M}\right)^2 \rho_0 u^{eq}(\rho).$$

À partir du lemme de Gronwall, l'intégration de cette inégalité différentielle donne la condition suffisante

$$u^{eq}(\rho) \geq u^{eq}(\rho^*) \exp\left(-\frac{\rho_0}{\rho_M} \frac{\rho - \rho^*}{\rho_M}\right). \quad (66)$$

pour tout $\rho^* \in [0, \rho_M)$. Généralement, pour des lois d'équilibre usuelles en trafic routier, la condition de stabilité (49) ne sera pas satisfaite dans la région de trafic dense. Considérons la loi triangulaire (voir [16])

$$u^{eq}(\rho) = u_f \min\left(1, \frac{(\rho - \rho_M)\rho_c}{(\rho_c - \rho_M)\rho}\right), \quad \rho \in [0, \rho_M], \quad (67)$$

où $\rho_c \in (0, \rho_M)$ est la densité critique séparant les régimes fluides et denses. En prenant $\rho_c = \omega\rho_M$ avec $\omega \in [0, 1]$, il est facile de montrer que la condition de stabilité devient

$$u^{eq}(\rho) \geq \frac{u_f \omega \rho_M}{(1 - \omega)\rho_0}. \quad (68)$$

La valeur de la constante ρ_0 peut ainsi être calibrée de façon à obtenir la région d'instabilité souhaitée. Par exemple, pour obtenir une région de stabilité linéaire définie par $u^{eq}(\rho) \geq \kappa u_f$ avec $\kappa \in (0, 1)$, ρ_0 devient

$$\rho_0 = \frac{\omega}{(1 - \omega)\kappa} \rho_M. \quad (69)$$

Cas d'un terme source de relaxation avec $\alpha \neq 0$

Pour $\alpha \neq 0$, nous avons

$$\partial_t u + u\left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right)\partial_x u = \left(\frac{|u^{eq}(\rho) - u|}{\ell(\rho)}\right)^\alpha \left(\frac{1}{\delta(\rho)}\right)^{1-\alpha} (u^{eq}(\rho) - u).$$

Dans ce cas, une linéarisation de l'équation vers un état constant (ρ^0, u^0) , $u^0 = u^{eq}(\rho^0)$ donne simplement

$$\partial_t \tilde{u} + u^0\left(1 - \frac{\rho^0}{\rho_0}\right)\partial_x \tilde{u} = 0.$$

Les ondes planes solutions du système linéarisé doivent satisfaire les conditions de compatibilité

$$\begin{pmatrix} ik u^0 & ik \rho^0 \\ 0 & ik(1 - r)u^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\rho}^0 \\ \tilde{u}^0 \end{pmatrix} = -\lambda \begin{pmatrix} \tilde{\rho}^0 \\ \tilde{u}^0 \end{pmatrix}. \quad (70)$$

Les valeurs propres sont celles du système homogène, c'est-à-dire des nombres complexes purement imaginaires et le système linéarisé est stable vers tout état constant $(\rho^0, u^{eq}(\rho^0))$ pour tout $\rho_0 > 0$. Remarquons que pour le cas $\alpha = 1$, on obtient un terme quadratique de retour à l'équilibre qui est nommé terme de trainée en mécanique des fluides.

3.3.5 Vers un modèle hybride : équation de transport sur les distributions de temps inter-véhiculaires

Dans l'optique de modéliser l'ensemble des résultats obtenus dans le chapitre 2, nous proposons une hybridation du système vers une formulation méso-macroscopique. À un niveau mésoscopique, le but est de modéliser l'évolution de la distribution des temps inter-véhiculaires en temps et en espace. Nous notons τ la valeur d'un temps inter-véhiculaire microscopique, généralement en secondes. La quantité $\psi(x, \tau, t)$ décrit la densité de véhicules ayant le temps inter-véhiculaire τ à la position x . La fonction ψ est une fonction de densité vérifiant

$$\int \psi(x, \tau, t) d\tau = 1, \quad (71)$$

avec un moment d'ordre 1 $\bar{\tau}(x, t)$ tel que

$$\int \tau \psi(x, \tau, t) d\tau = \bar{\tau}(x, t), \quad (72)$$

qui représente le temps inter-véhiculaire moyen. De la même façon le moment d'ordre 2

$$\int (\tau - \bar{\tau}(x, t))^2 \psi(x, \tau, t) d\tau = \sigma_\tau^2(x, t). \quad (73)$$

définit la variance des temps inter-véhiculaires.

À partir de ces quantités, une équation de type transport-réaction va gouverner l'évolution de la quantité $\psi(x, \tau, t)$:

$$\partial_t(\rho\psi(x, \tau, t)) + \partial_x(\rho\psi(x, \tau, t)u) = \rho \frac{\psi^{eq}(x, \tau, t) - \psi(x, \tau, t)}{\lambda}. \quad (74)$$

$\psi^{eq}(x, \tau, t)$ représentant la distribution d'équilibre. Comme il a été montré dans le chapitre 2, les données réelles ont fait ressortir une bonne adéquation de la loi log-normale à la distribution des TIV [13]. En introduisant la dérivée Lagrangienne $D_t = \partial_t + u\partial_x$, on obtient la formulation analytique suivante :

$$D_t\psi = \frac{\psi^{eq}(x, \tau, t) - \psi(x, \tau, t)}{\lambda}. \quad (75)$$

3.3.6 Synthèse

Pour conclure cette section, rappelons le système complet hybride, composé d'équations macroscopiques et mésoscopiques :

$$\partial_t\rho + \partial_x(\rho u) = 0, \quad (76)$$

$$\partial_t(\rho u) + \partial_x(\rho u^2) - \partial_x\left(\rho_0 \frac{u^2}{2}\right) = \rho \eta(\rho, u) (u^{eq}(\rho) - u), \quad (77)$$

$$\partial_t(\rho\psi(x, \tau, t)) + \partial_x(\rho\psi(x, \tau, t)u) = \rho \frac{\psi^{eq}(x, \tau, t) - \psi(x, \tau, t)}{\lambda}. \quad (78)$$

3.4 Intégration des effets météorologiques dans les modèles

3.4.1 Modèles du premier ordre

Dans le chapitre 2, nous avons conclu que la pluie affecte les paramètres du diagramme fondamental que sont la vitesse libre, la capacité et la densité critique. Des quantifications ont été proposées, valables pour des précipitations de l'ordre de 0 à 3 mm/h (intensité de pluie modérée). Les résultats les mieux validés (taille des échantillons et cohérence avec les autres études) ont été obtenus pour cette gamme de précipitations sur des sections de type interurbain. De même, le travail de modélisation présenté dans ce chapitre ne pourrait être valide que sur ce genre de section. L'intensité de la pluie représente un paramètre continu qui peut être introduit dans la modélisation du trafic. Notons $\mu \in [0, 1]$ ce paramètre qui représentera le taux de précipitation : $\mu = 0$ renvoie donc à des conditions météorologiques clémentes (beau temps) tandis que $\mu = 1$ représente les conditions météorologiques d'intensité maximale (ici 3 mm/h de précipitation). En croisant et en interpolant les résultats obtenus dans le chapitre 2, il est possible d'obtenir un diagramme paramétré par le paramètre μ . Dans ce travail, une relation triangulaire entre débit et densité sera utilisée comme dans beaucoup d'autres travaux actuels (voir [34]). La figure 3.6 montre une relation triangulaire paramétrée obtenue à partir des travaux précédents et des valeurs de réduction constatées sur les paramètres capacité et vitesse libre :

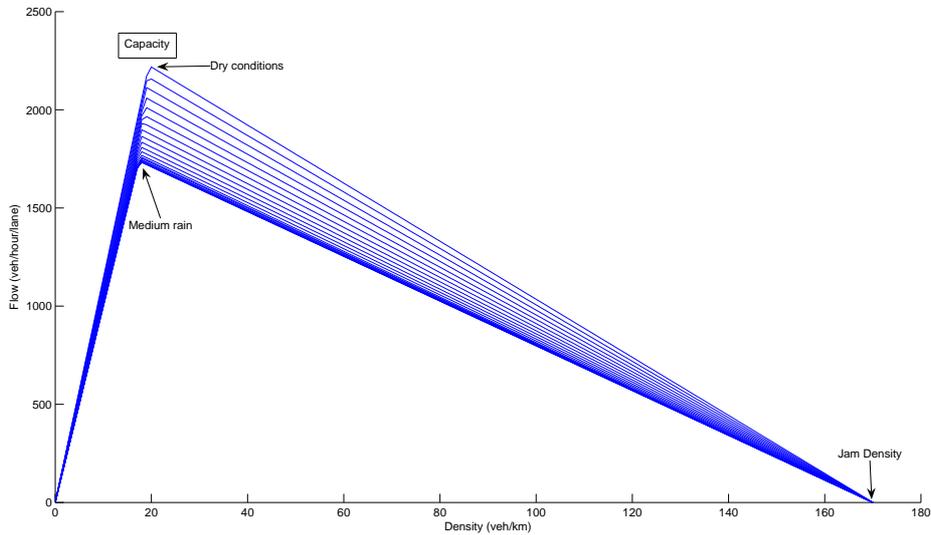


Figure 3.6 – Paramétrage d'un diagramme fondamental triangulaire

Ainsi, des conditions météorologiques pluvieuses agissent directement sur la vitesse libre u_f et la capacité q_M , ajoutant le paramètre μ au diagramme fondamental

$$q = q^{eq}(\rho, \mu). \quad (79)$$

Pour des diagrammes fondamentaux Lipschitziens, \mathcal{C}^1 par morceaux, il est raisonnable d'après les résultats empiriques de supposer que

$$\frac{\partial q^{eq}}{\partial \mu}(\rho, \mu) < 0 \quad \forall \mu \in [0, 1], \quad (80)$$

signifiant qu'il y a donc une perte de débit lorsque l'intensité de la pluie augmente.

Les modèles de trafic du premier ordre considèrent l'équation de continuité avec un débit à l'équilibre statistique, soit

$$\partial_t \rho + \partial_x [q^{eq}(\rho, \mu)] = 0. \quad (81)$$

Pour des raisons de simplicité, μ est supposé C^∞ et ne dépend que de l'espace à travers la variable x . En écrivant l'équation de conservation sous une forme de transport-réaction, il s'ensuit que

$$\partial_t \rho + \frac{\partial q^{eq}}{\partial \rho}(\rho, \mu(x)) \partial_x \rho = - \frac{\partial q^{eq}}{\partial \mu}(\rho, \mu(x)) \mu'(x). \quad (82)$$

Il est clair que

$$a(\rho, x) = \frac{\partial q^{eq}}{\partial \rho}(\rho, \mu(x)) \quad (83)$$

définit la vitesse caractéristique locale de l'information, dépendant non seulement de ρ mais aussi de x à travers $\mu(x)$. Le régime de trafic fluide, aussi appelé non congestionné, correspond aux conditions locales pour lesquelles

$$\frac{\partial q^{eq}}{\partial \rho}(\rho, \mu) > 0. \quad (84)$$

Et, réciproquement, le régime congestionné correspond aux cas

$$\frac{\partial q^{eq}}{\partial \rho}(\rho, \mu) < 0. \quad (85)$$

Les conditions critiques correspondent au cas particulier où $\partial_\rho q^{eq}(\rho_c(\mu), \mu) = 0$ à la densité critique $\rho_c(\mu)$. Notons que ρ_c est également une fonction de μ .

Le terme de droite de (82) est une sorte de terme de réaction lors de conditions météorologiques localement changeantes (terme $\mu'(x)$). En introduisant la vitesse à l'équilibre $u^{eq}(\rho, \mu) \geq 0$ telle que

$$q^{eq}(\rho, \mu) = \rho u^{eq}(\rho, \mu), \quad (86)$$

il est courant en théorie du trafic de supposer

$$\frac{\partial u^{eq}}{\partial \rho}(\rho, \mu) \leq 0, \quad (87)$$

étant donnée que la vitesse caractéristique est inférieure à la vitesse matérielle du flot de véhicule, soit

$$\frac{\partial q^{eq}}{\partial \rho}(\rho, \mu) = u^{eq}(\rho, \mu) + \rho \frac{\partial u^{eq}}{\partial \rho}(\rho, \mu).$$

En introduisant la dérivée Lagrangienne par rapport au débit

$$D_t = \partial_t + u^{eq}(\rho, \mu) \frac{\partial}{\partial x}, \quad (88)$$

on obtient

$$D_t \rho + \rho \frac{\partial u^{eq}}{\partial \rho}(\rho, \mu) \partial_x \rho = - \frac{\partial q^{eq}}{\partial \mu}(\rho, \mu(x)) \mu'(x). \quad (89)$$

3.4.1.1 Propriétés de quelques solutions particulières

Des solutions particulières sont analysées afin de déterminer leur sensibilité par rapport au paramètre météorologique μ . Tout d'abord, dans un cadre Lagrangien, on considère des solutions stationnaires, soit $D_t \rho = 0$ (pas de variations locales pour les conducteurs). Si $\partial_\rho u^{eq} < 0$, nous avons

$$\partial_x \rho = - \left[\rho \frac{\partial u^{eq}}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial u^{eq}}{\partial \mu} \mu'(x),$$

Par conséquent, sous les hypothèses (80) et (87), on note

$$\text{sgn}(\partial_x \rho) = - \text{sgn}(\mu'). \quad (90)$$

Une hausse du taux de précipitation signifie $\mu' > 0$ et ainsi $\partial_x \rho < 0$. Il y a une perte de densité des véhicules due à une augmentation des distances inter-véhiculaires lors de conditions pluvieuses.

Dans un cadre Eulérien, les solutions stationnaires sont caractérisées par $\partial_t \rho = 0$. L'équation de conservation indique que les solutions stationnaires évoluent spatialement à débit constant :

$$q^{eq}(\rho(x), \mu(x)) = C. \quad (91)$$

Pour des conditions non critiques $\frac{\partial q^{eq}}{\partial \rho} \neq 0$, nous obtenons à partir de (82)

$$\rho'(x) = - \left[\frac{\partial q^{eq}}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial q^{eq}}{\partial \mu} \mu'(x). \quad (92)$$

En conséquence, pour un trafic fluide, nous avons

$$\text{sgn}(\rho') = \text{sgn}(\mu') \quad (93)$$

tandis que pour un trafic congestionné, nous obtenons

$$\text{sgn}(\rho') = - \text{sgn}(\mu'). \quad (94)$$

Une hausse des précipitations sous des conditions fluides produit une augmentation de la densité à cause de la baisse de la vitesse libre. Cependant, lors d'un régime de trafic dense, une hausse du taux de précipitation entraîne une baisse de la densité, et ainsi une augmentation de la vitesse libre. Ce résultat, contre-intuitif, peut s'expliquer par le fait que les conducteurs augmentent leurs distances de sécurité, produisant une baisse de la densité qui se répercute dans notre modèle par une hausse des vitesses.

3.4.2 Modèle du deuxième ordre et système hybride

Modèle macroscopique à deux équations

Le modèle à deux équations dérivé d'une formulation Vlasov permet d'intégrer l'intensité de la pluie $\mu \in [0, 1]$ aussi bien dans le paramètre de relaxation vers l'équilibre $\eta(\rho, u, \mu)$ que dans la distribution d'équilibre ($u^{eq}(\rho, \mu)$) elle-même. Le système s'écrit ainsi

$$\partial_t \rho + \partial_x(\rho u) = 0, \quad (95)$$

$$\partial_t(\rho u) + \partial_x(\rho u^2) - \partial_x\left(\frac{1}{2}\rho_0 u^2\right) = \rho \eta(\rho, u, \mu) (u^{eq}(\rho, \mu) - u). \quad (96)$$

En comparaison avec une formulation du premier ordre LWR classique, le modèle proposé, appartenant à la famille des modèles d'ordre supérieur, peut apporter une information supplémentaire. Outre le paramétrage du diagramme fondamental à travers le terme $u^{eq}(\rho, \mu)$, le taux de relaxation vers l'équilibre peut être lui aussi rendu dépendant de la météorologie. Cet aspect semble particulièrement pertinent en termes de considérations physiques et de futures applications. En effet, il est tout à fait probable que le temps de relaxation ne soit pas le même quelles que soient les conditions météorologiques. En particulier, il est logique de penser que le début d'un événement pluvieux représente une période d'incertitude qui traduit le fait que les conducteurs doivent s'adapter à la dégradation des conditions de circulation, de l'état de la chaussée, de la visibilité, etc. Cette période d'incertitude peut se modéliser avec le choix d'un terme de relaxation dépendant de μ , noté $\eta(\rho, u, \mu)$.

Equation sur les temps inter-véhiculaires

En suivant l'approche précédente pour le paramétrage du diagramme fondamental, nous pouvons proposer une modélisation des temps inter-véhiculaires dépendante de la météorologie. Rappelons que le concept de temps inter-véhiculaire manié ici est celui de *time headway*, correspondant à l'intervalle de temps entre le passage en un point de l'avant de deux véhicules successifs. Il ne doit donc pas être confondu avec le concept voisin de *time gap*, qui décrit pour sa part l'intervalle de temps entre les passages en un point de l'arrière du premier véhicule et de l'avant du poursuivant. À ce niveau microscopique d'analyse, les études ont souligné une tendance des conducteurs à augmenter leurs temps inter-véhiculaires lors d'une météorologie dégradée. En particulier, la fréquence des TIV courts (inférieurs à 2 secondes) est plus faible lors de conditions pluvieuses. À partir des résultats statistiques, la loi log normale étant un choix satisfaisant pour modéliser la densité des temps inter-véhiculaires, il est ensuite possible de paramétrer cette loi en fonction du paramètre μ (figure 3.7), en fonction de la disponibilité des catégories météorologiques. Comme le montre la figure 3.7, les changements de forme de la fonction de densité traduisent les changements dans les comportements des conducteurs avec les conditions météorologiques. Plus l'intensité de la pluie est grande, plus la densité des TIVs courts est faible. Les conducteurs adaptent leurs distances et temps inter-véhiculaires pour se sentir plus en sécurité.

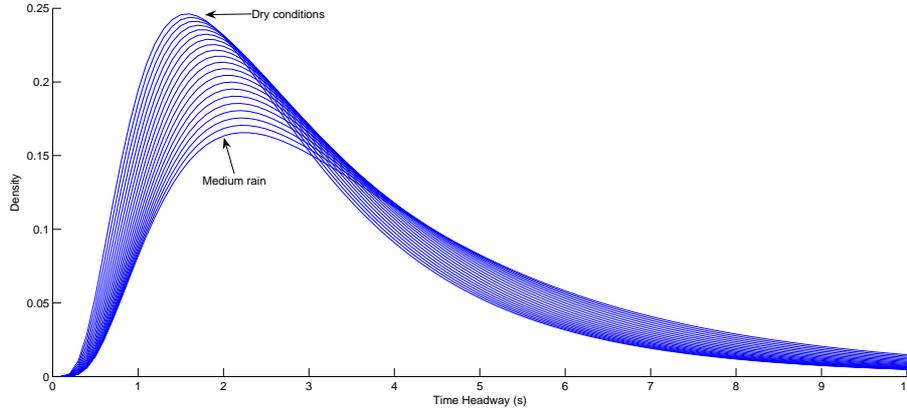


Figure 3.7 – Paramétrage de la distribution des temps inter-véhiculaires.

Une modélisation mésoscopique a été présentée précédemment avec une équation de transport-réaction pour la quantité $\psi(x, \tau, t)$. Au sein de l'équation originale, c'est donc la distribution d'équilibre $\psi^{eq}(\mu, x, \tau, t)$ qui devient paramétrée par l'intensité de la pluie μ , pour donner le système suivant :

$$\partial_t(\rho\psi(x, \tau, t)) + \partial_x(\rho\psi(x, \tau, t)u) = \rho \frac{\psi^{eq}(\mu, x, \tau, t) - \psi(x, \tau, t)}{\lambda(\mu)}. \quad (97)$$

En ce qui concerne le temps de relaxation vers l'équilibre, la même remarque s'applique ici avec une variable λ qui peut dépendre de μ , décrivant ainsi un retour vers la distribution d'équilibre pouvant lui aussi dépendre des conditions météorologiques.

Système complet avec intégration de la météorologie

Pour résumer cette section, rappelons le système complet, avec les équations mésoscopiques et macroscopiques qui intègrent le paramètre météorologique μ :

$$\partial_t \rho + \partial_x(\rho u) = 0, \quad (98)$$

$$\partial_t(\rho u) + \partial_x(\rho u^2) - \partial_x(\rho_0 \frac{u^2}{2}) = \rho \eta(\rho, u, \mu) (u^{eq}(\rho) - u), \quad (99)$$

$$\partial_t(\rho\psi(x, \tau, t)) + \partial_x(\rho\psi(x, \tau, t)u) = \rho \frac{\psi^{eq}(\mu, x, \tau, t) - \psi(x, \tau, t)}{\lambda(\mu)}. \quad (100)$$

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, après un panorama de la modélisation du trafic et de ses différentes approches, une formulation générale non linéaire de type Vlasov a été introduite pour modéliser d'un point de vue cinétique les distributions des variables fondamentales du trafic. En fonction de la fermeture de certains termes et du niveau de précision souhaité, la formulation Vlasov permet la dérivation d'une hiérarchie de modèles, qu'ils soient du premier ou du deuxième ordre. Ici, nous avons proposé un nouveau modèle à deux équations, qui prend en compte les effets des conditions

météorologiques sur le trafic, mis en exergue par les résultats du chapitre 2. Le modèle partage des points communs avec les modèles anisotropes de type Aw-Rascole ou Zhang, mais s'en différencie en faisant notamment apparaître la dérivée spatiale de la vitesse. L'étude du système a permis de mettre en évidence des conditions de stabilité linéaire qui dépendent de la forme du terme de relaxation choisi et d'une certaine constante. L'utilisation d'un modèle à deux équations par rapport à un modèle simple LWR s'est également justifiée : si l'intégration d'un paramètre représentant l'intensité de la pluie est triviale dans un modèle du premier ordre avec le paramétrage du diagramme fondamental, une modélisation à deux équations apporte plus de richesse avec la caractérisation des situations hors équilibre et la présence de termes de relaxation paramétrables en fonction de la météorologie. Les propriétés et capacités du modèle introduit doivent à présent être justifiées par des expériences numériques, qui ne seront rendues possibles que par une discrétisation efficace de ce dernier.

Discrétisation numérique et expérimentations

Sommaire

4.1	Introduction	98
4.2	Discrétisation numérique	98
4.2.1	Discrétisation temporelle : méthode à pas fractionnaire	98
4.2.2	Discrétisation spatiale : schéma Lagrange-projection	102
4.2.3	Traitement des conditions aux limites	105
4.3	Expérimentations	107
4.3.1	Données initiales en créneau	107
4.3.2	Mise en évidence des instabilités linéaires et non linéaires du modèle	108
4.3.3	Comportement du modèle face aux changements météorologiques	111
4.4	Bilan des expériences numériques	122

4.1 Introduction

Après la formulation d'un modèle théorique de trafic, la discrétisation numérique consiste à étudier une section de longueur finie découpée en un certain nombre de cellules à l'intérieur desquelles les variables globales du trafic (ex : vitesse, densité) seront calculées à chaque pas de temps. Un schéma numérique doit être mis en place, qui gouvernera la mise à jour des différentes quantités à chaque pas de temps. En trafic routier, le schéma de Godunov a été (et est toujours) largement utilisé [93] de par son succès et ses propriétés remarquables (schéma entropique pour toutes les entropies). Cependant, ce schéma presque théorique impose de connaître les structures des solutions entropiques et sa mise en oeuvre peut être contraignante. Dans ce travail, l'approche numérique se fonde sur une méthode à pas fractionnaire [104, 146] qui permet de traiter successivement la partie convective du système et le terme source. Cette méthode, connue également sous le nom de *splitting* de Strang, repose sur trois étapes qui seront détaillées dans un premier temps. Pour la partie convective du système, nous proposons un schéma de type Lagrange-projection, nommé également Lagrange+remap [140]. Ce type de schémas, à notre connaissance inédit en trafic routier, permet de tirer parti des avantages de la formulation Lagrangienne tout en restant dans un cadre Eulérien, les données de type boucle étant elle-mêmes Eulériennes. Ce schéma permet également une mise en oeuvre simple sans faire intervenir de flux numériques complexes ou de calcul de matrice jacobienne aux interfaces. Nous illustrerons le comportement de notre modèle dans la section 4.3 grâce à une série d'expériences numériques. Ces simulations permettront de vérifier les résultats obtenus dans le chapitre 3 mais aussi de mettre en lumière d'autres propriétés, notamment la faculté à développer des instabilités non linéaires dans la région dense, pouvant être assimilées à des ondes physiques *stop-and-go*. Enfin, la capacité du modèle à reproduire les changements dans l'évolution du flot de véhicules face à la météorologie sera illustrée de façon exhaustive avec un certain nombre de cas tests.

4.2 Discrétisation numérique

4.2.1 Discrétisation temporelle : méthode à pas fractionnaire

Le modèle est discrétisé sur une section de 1 km avec des conditions aux limites circulaires. Un maillage uniforme est initialement défini avec N points de discrétisation dans l'espace. Un pas uniforme $h > 0$ introduit les points de discrétisation

$$x_j = jh, \quad j \in Z. \quad (1)$$

Concernant la discrétisation temporelle, à partir d'un instant initial $t^0 = 0$, une séquence $(t^n)_{n \in N}$ est construite avec un pas de temps $(\Delta t^n > 0)_{n \in N}$, tel que

$$t^{n+1} = t^n + \Delta t^n. \quad (2)$$

À chaque point de discrétisation, les vitesses u_j^n sont considérées, qui sont une discrétisation de la solution continue u en une position spatiale x_j au temps t^n .

Plus précisément, on prend en considération le terme

$$u_{j+\frac{1}{2}} = \frac{dx_{j+\frac{1}{2}}}{dt}, \quad (3)$$

c'est-à-dire la vitesse aux interfaces, que l'on choisira par rapport à la nature des solutions du problème de Riemann.

Principe général

La structure complexe de notre modèle à deux équations inclut une partie convective et un terme source. Nous proposons une méthode dite à pas fractionnaire (*fractional step method*) pour traiter les deux parties du système (partie homogène à gauche et terme source à droite) successivement. Les méthodes à pas fractionnaire [104, 146] constituent des schémas d'avancée en temps pour lesquels le système d'équations aux dérivées partielles est divisé en plusieurs sous-problèmes bien posés, qui peuvent se résoudre séquentiellement de façon plus simple (le terme anglais, *splitting*, traduit bien cette idée). Ce type d'approche s'adapte bien au traitement numérique de problèmes complexes, où plusieurs phénomènes cohabitent (convection, diffusion, etc.). Illustrons le principe de la méthode dans un cadre différentiel. En considérant le problème

$$\frac{du}{dt} = Au + Bu, \quad (4)$$

de condition initiale $u(0) = u^0$, où A et B sont deux matrices carrées. Connaissant les conditions initiales, la solution analytique est connue et vaut

$$u(t) = \exp((A+B)t)u^0, \quad t \geq 0. \quad (5)$$

Le principe général d'une méthode à pas fractionnaire consiste alors en une méthode itérative où chaque itération est composée de deux étapes. On résout d'abord

$$\frac{du}{dt} = Au, \quad (6)$$

avec $u(0) = u^0$, dont la solution au temps Δt est $u(\Delta t) = \exp(A\Delta t)u^0$, puis

$$\frac{d\hat{u}}{dt} = B\hat{u}, \quad (7)$$

avec comme condition initiale la solution du premier problème, à savoir

$$\hat{u}(0) = \hat{u}^0 = \exp(A\Delta t)u^0. \quad (8)$$

La solution au temps Δt est alors

$$\hat{u}(\Delta t) = \exp(B\Delta t)\exp(A\Delta t)u^0, \quad (9)$$

qui est une solution approchée de la solution analytique, d'ordre 1 en général et d'ordre 2 si les matrices A et B commutent.

L'ordre 1 suffit à montrer la consistance de la méthode. Quant à la stabilité, elle dépend des schémas numériques utilisés pour résoudre chaque sous-problème. Il existe plusieurs types de variantes dans la famille des méthodes à pas fractionnaire. Dans cette thèse, nous avons appliqué la méthode de Strang d'ordre 2. Le *splitting* symétrique de Strang consiste à résoudre le premier sous-problème sur un pas de temps $\frac{\Delta t}{2}$, puis le deuxième sur un pas de temps Δt , avant de finir par résoudre une seconde fois le premier sous-problème sur un pas de temps $\frac{\Delta t}{2}$, la valeur de u et les conditions initiales changeant donc au cours des trois étapes. Concrètement, au temps Δt , on note $P_A^{\Delta t} u^0$ la solution de

$$\frac{du}{dt} = Au, \quad (10)$$

$$u(0) = u^0, \quad (11)$$

et $P_B^{\Delta t} u^0$ la solution de

$$\frac{du}{dt} = Bu, \quad (12)$$

$$u(0) = u^0. \quad (13)$$

Le *splitting* de Strang consiste à approcher la solution par

$$\hat{u}(\Delta t) = P_A^{\frac{\Delta t}{2}} P_B^{\Delta t} P_A^{\frac{\Delta t}{2}} u^0. \quad (14)$$

Cette méthode correspond à la solution formelle

$$\hat{u}(\Delta t) = \exp\left(A\frac{\Delta t}{2}\right) \exp(B\Delta t) \exp\left(A\frac{\Delta t}{2}\right) u^0. \quad (15)$$

Un développement de Taylor au voisinage de Δt montre que la méthode est d'ordre 2 en temps. Le *splitting* peut se généraliser au cas de plusieurs opérateurs et il est clair que des ordres plus élevés pourraient être atteints par des combinaisons successives des opérateurs selon le principe originel de Strang. Ceci n'est cependant pas le propos de ce travail, qui appliquera la méthode à pas fractionnaire de Strang à l'ordre 2 en temps au modèle de trafic à deux équations dérivé de la formulation Vlasov. Cette méthode permettra dans notre cas de traiter distinctement la partie convective et le terme source.

Application au modèle macroscopique à deux équations

Rappelons d'abord le système d'équations macroscopiques dérivé du formalisme Vlasov :

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 - \frac{1}{2} \rho_0 u^2 \end{pmatrix} = S. \quad (16)$$

Le traitement de l'équation de type mésoscopique sur les temps inter-véhiculaires est effectué en parallèle et évoqué postérieurement. Pour le moment, nous développons la méthode à pas fractionnaire du second ordre qui, comme nous venons de le voir, autorise à traiter successivement la partie convective du système et le terme source. Pour la discrétisation de la partie convective, nous détaillerons par la suite une approche de type Lagrange-projection (Lagrange+remap).

La méthode à pas fractionnaire se décompose en trois étapes :

1. La première étape consiste à intégrer la partie non homogène du système

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \end{pmatrix} + 0 = S. \quad (17)$$

sur un pas de temps $\Delta t^n/2$, *i.e.*

$$\frac{d}{dt}(\rho_j) = 0, \quad \frac{d}{dt}(u_j) = \left(\frac{|u^{eq}(\rho_j) - u_j|}{\ell(\rho_j)} \right)^\alpha \left(\frac{1}{\delta(\rho_j)} \right)^{1-\alpha} (u^{eq}(\rho_j) - u_j)$$

avec les conditions initiales

$$\rho_j(0) = \rho_j^n \text{ et } u_j(0) = u_j^n.$$

Nous obtenons $\rho_j^{(1)}$ et $u_j^{(1)}$. Le problème différentiel peut être exactement intégré. Par exemple, pour $\alpha = 0$, nous obtenons

$$u_j^{(1)} = u^{eq}(\rho_j^n) + (u_j^n - u^{eq}(\rho_j^n)) \exp\left(-\frac{\Delta t}{2\delta(\rho_j^n)}\right), \quad \forall j. \quad (18)$$

2. La deuxième étape consiste à résoudre la partie homogène du système hyperbolique

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 - \frac{1}{2}\rho_0 u^2 \end{pmatrix} = 0. \quad (19)$$

sur un pas de temps Δt . Une approche Lagrange+remap est alors appliquée, qui sera décrite en détail par la suite. Nous obtenons $\rho_j^{(2)}$ et $u_j^{(2)}$.

3. La troisième et dernière étape du *splitting* de Strang réside dans l'intégration de la partie non homogène du système, encore une fois sur un pas de temps $\Delta t^n/2$, *i.e.*

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \end{pmatrix} + 0 = S. \quad (20)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_j) = 0, \quad \frac{d}{dt}(u_j) = \left(\frac{|u^{eq}(\rho_j) - u_j|}{\ell(\rho_j)} \right)^\alpha \left(\frac{1}{\delta(\rho_j)} \right)^{1-\alpha} (u^{eq}(\rho_j) - u_j),$$

avec les conditions initiales $\rho_j(0) = \rho_j^{(2)}$, $u_j(0) = u_j^{(2)}$. On obtient ρ_j^{n+1} et u_j^{n+1} .

4.2.2 Discrétisation spatiale : schéma Lagrange-projection

L'approche proposée se fonde sur le formalisme Lagrange-projection [140], qui se compose de deux étapes :

- **Étape Lagrange** : conservation de la masse et de la quantité de mouvement massique pour une cellule j ,
- **Étape Projection (remap)** : projection de la solution discrète convectée sur le maillage Eulérien initial et bilan de conservation.

Étape Lagrange

Il est possible de construire rigoureusement l'étape Lagrange en prenant appui sur le théorème de Transport de Reynolds :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{v_t} q(x, t) = \int_{v_t} \{ \partial_t q + \partial_x u q \} dx, \quad (21)$$

qui permet la dérivation de toute l'information nécessaire à la discrétisation. Cette idée est illustrée en donnant à la quantité quelconque q du théorème de Reynolds des valeurs différentes et en se servant de notre système initial :

- (a) $q = \rho$: $\frac{\partial}{\partial t} \int_{v_t} \rho dx = 0$ (grâce à l'équation de conservation),
- (b) $q = 1$: $\frac{\partial}{\partial t} v_t = \int_{v_t} dx(u) dx = u^+ - u^-$,
- (c) $q = \rho u$: $\frac{\partial}{\partial t} \int_{v_t} \rho u dx = \int_{v_t} \{ \partial_t \rho u + \partial_x \rho u^2 \} dx = \int_{v_t} \rho \eta (u^{eq} - u) + \int_{v_t} dx u^2 \frac{\rho_0}{2}$.

Cette déclinaison du théorème de Reynolds rend possible la dérivation de tous les schémas d'avancée en temps pour nos différentes quantités. (a) traduit simplement la conservation de la masse au cours du temps, soit $\frac{dM}{dt} = 0$ ou encore

$$\rho_j^{n+1} h_j^{n+1} = m_j = \rho_j^n h_j^n. \quad (22)$$

De (b), on peut déduire la mise à jour de la taille d'une cellule j par rapport aux vitesses d'interface. Ici, nous savons que les solutions entropiques correspondent à trois états constants séparés par une 1-onde, qui sera soit une onde de choc soit une onde de raréfaction, et une 2-discontinuité de contact. La structure des solutions fait que, considérant une cellule j , l'information provient de la cellule suivante $j + 1$. Il apparaît ainsi naturel de considérer pour les interfaces des vitesses de type *upwind*

$$u_{j+1/2} = u_{j+1}^{(1)}. \quad (23)$$

Ainsi, la cellule convectée j , après un pas de temps Δt^n a la nouvelle longueur

$$h_j^{(2)} = h + \Delta t^n (u_{j+1}^{(1)} - u_j^{(1)}). \quad (24)$$

La conservation de la masse à l'intérieur de la cellule j permet de mettre à jour la variable de densité :

$$\rho_j^{(2,*)} = \frac{h}{h_j^{(2)}} \rho_j^{(1)}. \quad (25)$$

Remarquons que (25) peut aussi s'écrire

$$\rho_j^{(2,\star)} = \rho_j^{(1)} - \frac{\Delta t^n}{h_j^{(2)}} \left(u_{j+1}^{(1)} - u_j^{(1)} \right) \rho_j^{(1)}, \quad (26)$$

ce qui est en accord avec l'équation sous forme Lagrangienne $\frac{d}{dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial x}$. De (c), il résulte que l'équation du débit q sous sa forme intégrale Lagrangienne est de la forme

$$\frac{d}{dt} \int_{I_t} q(x, t) dx - \int_{I_t} \partial_x \left(\frac{1}{2} \rho_0 u^2 \right) dx = 0$$

pour tout intervalle I_t se déplaçant avec le flot. D'après Reynolds ((c)), on peut approcher la quantité de mouvement massique telle que

$$\left(\int_{v_t} (\rho u) \right)_j^n \equiv \rho_j^n h_j^n u_j^n \equiv m_j u_j^n. \quad (27)$$

menant au schéma suivant pour la mise à jour des vitesses :

$$u_j^{(2,\star)} = u_j^{(1)} + \frac{\rho_0 \Delta t^n}{2h \rho_j^{(1)}} \left((u_{j+1}^{(1)})^2 - (u_j^{(1)})^2 \right). \quad (28)$$

La condition de type CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) suivante interdit les interactions d'ondes entre deux solutions successives de problèmes de Riemann locaux :

$$\frac{\Delta t}{h} \left[u_{j-1/2} - \min(0, u_{j+1/2} - c_{j+1/2}) \right] \leq 1. \quad (29)$$

Cette condition empêche une onde d'atteindre la cellule suivante pendant un pas de temps Δt .

Etape Projection (*remap*)

À partir de la discrétisation Lagrangienne précédente, l'étape de projection consiste à dériver une formulation Eulérienne plus propice à traiter les données géoréférencées de type boucles. Il s'agit également au cours de la validation numérique d'observer le comportement du modèle en un point fixe face à des conditions météorologiques changeantes. Dans cette optique, la phase *remap* applique, à partir du pas initial h , une projection conservative de la masse et de la quantité de mouvement massique. La figure 4.1 illustre cette projection.

Au temps t^{n+1} , les différentes quantités ont été convectées. Après la phase Lagrange, nous connaissons les quantités $u_j^{(2,\star)}$ et $\rho_j^{(2,\star)}$. Les longueurs des cellules ont changé et il s'agit de connaître les différentes quantités pour une cellule de taille $h = h_1 + h_2$ (voir figure 4.1). À partir des vitesses aux interfaces, nous savons que

$$h_1 = \Delta t^n u_j^n, \quad (30)$$

$$h_2 = h - h_1 = h - \Delta t^n u_j^n. \quad (31)$$

La conservation de la masse et de la quantité de mouvement massique donne

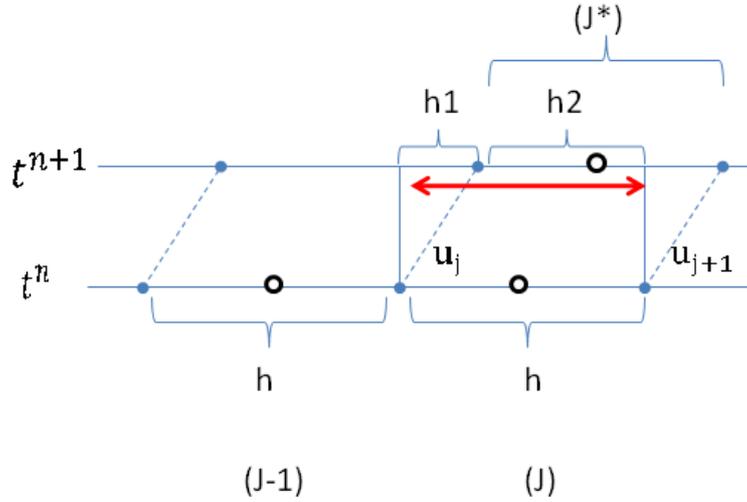


Figure 4.1 – Approche Lagrange+remap : après l'étape Lagrange, nécessité d'une projection conservative.

$$\text{Masse : } h_1 \rho_{j-1}^{(2,*)} + h_2 \rho_j^{(2,*)} = h \rho_j^{(2)}, \quad (32)$$

$$\text{Quantité de mouvement massique : } h_1 \rho_{j-1}^{(2,*)} u_{j-1}^{(2,*)} + h_2 \rho_j^{(2,*)} u_j^{(2,*)} = h \rho_j^{(2)} u_j^{(2)} \quad (33)$$

En introduisant, pour une interface, un nombre de Courant local de type

$$\nu_{j+1/2} = \frac{\Delta t^n}{h} u_{j+1}^{(1)}, \quad (34)$$

la phase projection consiste à mettre à jour les états en utilisant le schéma d'avancée suivant :

$$\rho_j^{(2)} = \nu_{j-1/2} \rho_{j-1}^{(2,*)} + (1 - \nu_{j-1/2}) \rho_j^{(2,*)}, \quad (35)$$

$$(\rho_j u_j)^{(2)} = \nu_{j-1/2} (\rho_{j-1} u_{j-1})^{(2,*)} + (1 - \nu_{j-1/2}) (\rho_j u_j)^{(2,*)}, \quad u_j^{(2)} = \frac{(\rho_j u_j)^{(2)}}{\rho_j^{(2)}} \quad (36)$$

Pour garantir les bonnes propriétés de stabilité, le pas de temps Δt^n doit être contraint pour respecter la condition CFL

$$\sup_{j \in \mathbb{Z}} \nu_{j+1/2} \leq 1. \quad (37)$$

Notons qu'avec la condition (29) précédente de la phase Lagrange, la condition CFL (37) est automatiquement respectée.

4.2.3 Traitement des conditions aux limites

Pour certaines expériences numériques, il est courant de considérer des conditions aux limites de type périodique, comme si la section discrétisée était une route circulaire. Mais, de façon sous-jacente, ce choix est également dicté par la simplicité des développements informatiques qu'il implique. Afin de confronter dans le futur un modèle avec des données réelles, la question des conditions aux limites ouvertes apparaît pleinement justifiée. La discrétisation d'une section réelle entraîne des données initiales en amont et en aval de la section. Il s'agit donc pour le modèle de traiter des conditions imposées en entrée et en sortie. Le but de cette sous-section est d'introduire cette problématique en proposant une démarche capable de respecter les contraintes imposées par une approche complexe de type Lagrange-projection.

Premièrement, le système original doit être rappelé :

$$\partial_t \rho + \partial_x(\rho u) = 0, \quad (38)$$

$$\partial_t(\rho u) + \partial_x(\rho u^2) - \partial_x\left(\rho_0 \frac{u^2}{2}\right) = \rho \eta(\rho, u) (u^{eq}(\rho) - u). \quad (39)$$

Ce système est strictement hyperbolique sur l'espace admissible restreint $\Omega^{ad,*} = \{U = (\rho, \rho u), \rho \in (0, \rho_M], u \in (0, u_f]\}$. Les valeurs propres sont $\lambda_1 = u - c = (1 - \frac{\rho_0}{\rho})u$ et $\lambda_2 = u$ avec $c = \frac{\rho_0}{\rho}u$. En prenant $\rho_0 \geq \rho$, nous avons $\lambda_1 \leq 0$. Dans ce cas, à l'interface, nous avons une caractéristique entrante et une autre sortante, comme le montre la figure 4.2.

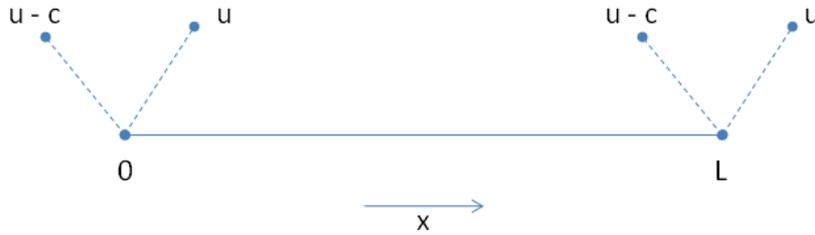


Figure 4.2 – Nature des solutions aux interfaces avec $\rho_0 \geq \rho$

Pour les conditions aux limites en aval (à droite), l'approche Lagrange-projection nécessite d'avoir une vitesse extérieure u_{N+1} . Cependant, dans les expérimentations réelles, il peut arriver que les données enregistrées par les boucles électromagnétiques soient plus souvent des débits. Dans ce cas, la valeur de la vitesse u_{N+1} peut être déduite du flux en amont q^* en considérant un solveur de Riemann local.

La condition aux limites en amont (à gauche) est moins intuitive. À la fin de l'étape Lagrange, nous connaissons les quantités $\rho_1^{(n+1,*)}$ et $q_1^{(n+1,*)}$ dans la cellule convectée $(1)^{n+1,*}$ (figure 4.3).

Pour l'étape de projection, la figure 4.4 illustre le manque d'information dans la partie triangulaire (T) . En s'intéressant en détail au triangle (T) de la figure 4.4, on peut considérer que le débit en amont q^* est une donnée connue du problème. En sachant que $h_0^{(n+1,*)} = \Delta t u_1^n$, le bilan de masse dans (T) peut être écrit

$$h_0^{(n+1,*)} \rho_0^{(n+1,*)} = 0 + (q^* - 0)\Delta t, \quad (40)$$

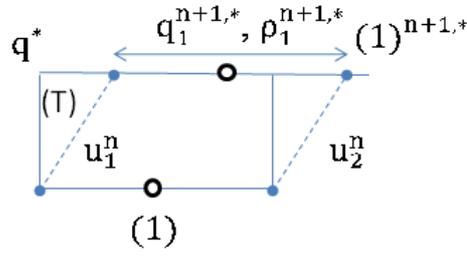


Figure 4.3 – Quantités connues à la fin de l'étape Lagrange.

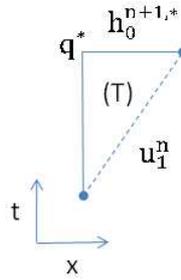


Figure 4.4 – Information manquante en amont.

où

$$\rho_0^{(n+1,*)} = \frac{q^*}{u_1^n}. \quad (41)$$

Quant au bilan de la quantité de mouvement massique (T), il prend la forme

$$\left(\rho_0^{(n+1,*)} u_1^{(n+1,*)} \right) h_0^{(n+1,*)} = 0 + \Delta t \left[(q^* u_1^n) - \frac{\rho_0}{2} (u_1^n)^2 + \frac{\rho_0}{2} (u_1^n)^2 \right], \quad (42)$$

d'où il s'ensuit

$$u_1^{(n+1,*)} = u_1^n. \quad (43)$$

Finalement, il suffit d'appliquer l'étape de projection en considérant

$$\rho_0^{(n+1,*)} = \frac{q^*}{u_1^n}, \quad (44)$$

$$q_0^{(n+1,*)} = q^*. \quad (45)$$

Ainsi, sous la simple hypothèse que la constante ρ_0 est supérieure à ρ (notons que l'hypothèse d'un ρ_0 grand est compatible avec la condition de stabilité linéaire pour le cas $\alpha = 0$), il semble possible de passer à des conditions aux limites ouvertes, ouvrant la voie à des applications de reconstruction de données ou d'estimation telles que celles abordées dans le dernier chapitre.

4.3 Expérimentations

Cette section des expériences numériques propose la mise en oeuvre du schéma exposé précédemment par un ensemble de simulations, visant à décrire la nature des solutions produites par le modèle en fonction de conditions initiales multiples et variées. Dans un premier temps, nous évoquerons une initialisation d'un problème en créneau de densité, puis la question des instabilités linéaires et non linéaires, avant de rentrer en détail dans le comportement du modèle du deuxième ordre proposé face à des conditions météorologiques évoluant dans l'espace.

4.3.1 Données initiales en créneau

On considère un domaine spatial $D = [0, 1]$ avec des conditions aux limites périodiques. Un maillage uniforme de $N = 800$ points est construit, le nombre CFL est égal à 0.45. Concernant le diagramme fondamental, on choisit une loi triangulaire entre débit et densité avec les paramètres suivants :

- Densité maximale $\rho_M = 250$ veh/km,
- Densité critique $\rho_c = 50$ veh/km soit $0.2 \rho_M$,
- Vitesse libre $u_f = 130$ km/h.

L'objectif de cette première expérience est de montrer la validité des solutions produites et la stabilité du schéma face à une initialisation en créneau de densité. La section est donc séparée en deux avec une discontinuité de la densité au point $x = 0.5$. Les conditions initiales sont une fonction $\rho^0(x)$ constante par morceaux avec pour le cas (a) de la figure 4.5

$$\rho^0(x) = \frac{1}{2}\rho_M \text{ pour } x \in (0, 1/2], \quad (46)$$

$$\rho^0(x) = \frac{3}{4}\rho_M + 10^{-4} \text{ pour } x \in (1/2, 1]. \quad (47)$$

$$u^0(x) = u^{eq}(\rho^0(x)). \quad (48)$$

et inversement pour le cas (b) (densité plus élevée à gauche).

Concernant les paramètres du modèle, $\rho_0 = \rho_M$ et le terme source correspond au cas $\alpha = 0$. $\delta(\rho)$ est choisi tel que

$$\delta(\rho) = \delta_0 \frac{u^{eq}(\rho)}{u_f},$$

avec $\delta_0 = 10^{-7} [h]$. Cette forme de $\delta(\rho)$ garantit que le paramètre tend vers 0 quand la densité approche la densité maximale.

La figure 4.5 montre la nature des solutions à ce problème classique de conditions initiales en créneau. Le modèle produit bien des résultats en accord avec la physique du trafic. Pour le cas (a), un choc s'est formé qui s'est déplacé de l'aval vers l'amont de la section. Dans le cas (b), qui correspond à un profil de densité décroissant, une onde de raréfaction entraîne des profils inverses de densité et vitesse à l'endroit du

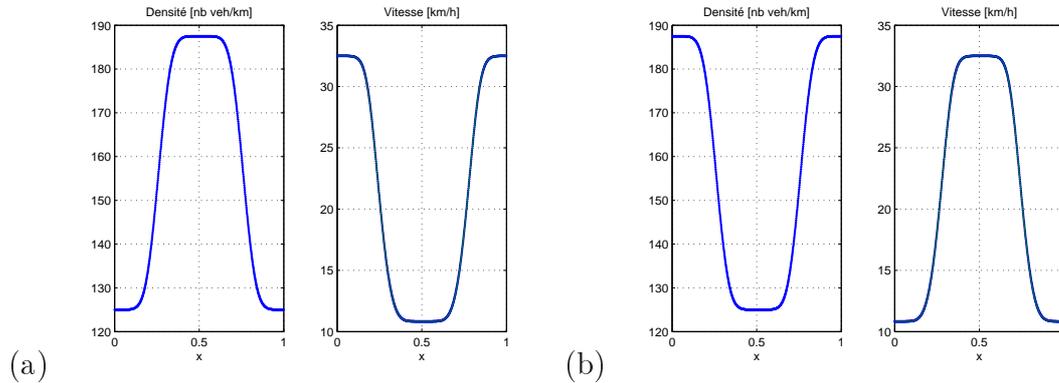


Figure 4.5 – Solutions en entrée et sortie d'un front de densité. Profils de densité et vitesse moyenne au temps $t = 0.1$, (a) Pour un profil de densité croissant et (b) pour un profil de densité décroissant.

choc, la baisse de densité menant à une augmentation de la vitesse du flot. Avec un temps de relaxation faible, les résultats mettent en exergue un comportement très proche du modèle LWR. Cette première expérience montre également la stabilité du schéma au cours des multiples itérations numériques.

4.3.2 Mise en évidence des instabilités linéaires et non linéaires du modèle

Cas $\alpha = 0$: instabilités linéaires

Après l'étude des propriétés du système, nous avons vu que la stabilité linéaire dépendait du choix du terme source. Le terme de relaxation peut être calibré avec un coefficient $\alpha = 0$ ou $\alpha = 1$. Cette forme bicéphale propose ainsi, dans un cas, un retour linéaire vers l'équilibre et, dans l'autre cas, un retour accentué par une formule de quadrature. Pour le cas $\alpha = 0$, nous avons montré que le système était conditionnellement linéairement stable selon le choix de la constante ρ_0 . La condition nécessaire et suffisante de stabilité linéaire vers un état d'équilibre constant $(\rho, u^{eq}(\rho))$ est

$$-\rho^2(u^{eq})'(\rho) \leq \rho_0 u^{eq}(\rho). \quad (49)$$

La valeur de la constante ρ_0 peut ainsi être calibrée afin d'obtenir une largeur attendue de la région d'instabilité. Les expérimentations numériques illustrent bien cette idée. Pour le premier cas test, la valeur ρ_0 est calculée à partir de la formule

$$\rho_0 = \frac{1}{\sigma} \frac{\omega}{1 - \omega} \rho_M$$

avec $\omega = \frac{\rho_c}{\rho_M} = \frac{1}{5}$ et σ choisi égal à $\frac{1}{2}$. Dans ce cas, la région linéairement instable correspond à des densités $\rho \in [0, \rho_M]$ telles que $u^{eq}(\rho) < \frac{u_f}{2}$. Ces choix arbitraires donnent $\rho_0 = \frac{1}{2}\rho_M$. La figure 4.6 montre la croissance des instabilités linéaires dans le cas $\alpha = 0$. Les conditions initiales sont une fonction $\rho^0(x)$ constante par morceaux

avec

$$\rho^0(x) = \frac{3}{4}\rho_M \text{ pour } x \in (0, 1/2], \quad (50)$$

$$\rho^0(x) = \frac{3}{4}\rho_M + 10^{-4} \text{ pour } x \in (1/2, 1]. \quad (51)$$

$$u^0(x) = u^{eq}(\rho^0(x)). \quad (52)$$

$\delta(\rho)$ est défini, comme précédemment, avec $\delta_0 = 10^{-4} [h]$. Sur la figure 4.6, il est montré qu'à partir de petites perturbations, des instabilités linéaires se développent dans la région dense, qui augmentent progressivement avec le temps.

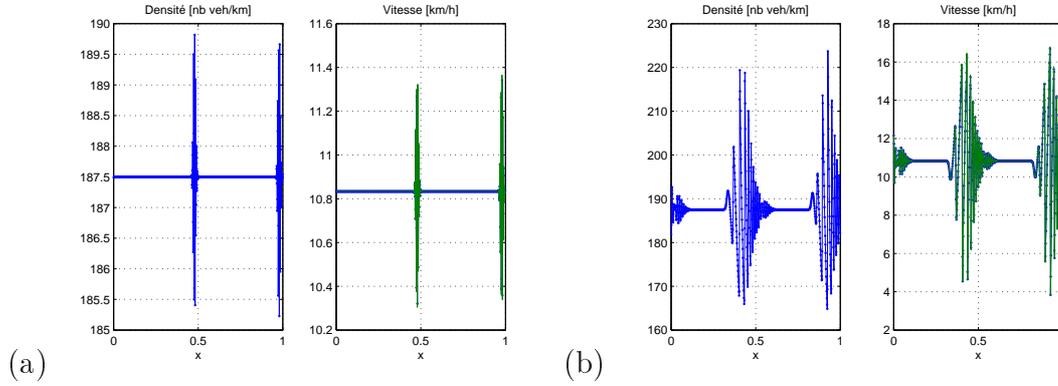


Figure 4.6 – Croissance des instabilités linéaires dans la région dense pour $\alpha = 0$ et $\rho_0 = \frac{1}{2}\rho_M$. Profils de densité et vitesse moyenne, (a) au temps $t = 0.002$ et (b) au temps $t = 0.1$.

L'influence de la valeur de ρ_0 s'avère primordiale dans le développement de ces instabilités. Par exemple, la valeur de ρ_0 a été choisie dans le cas test suivant de telle sorte que la région linéairement instable corresponde à des densités $\rho \in [0, \rho_M]$ telles que $u^{eq}(\rho) < \frac{u_f}{10}$. De ce choix découle une grande valeur de ρ_0 , qui, à partir des mêmes conditions initiales, va empêcher le développement d'instabilités linéaires (figure 4.7).

Ces deux cas tests permettent bien de retrouver les conditions entrevues lors de l'analyse mathématique de stabilité linéaire. Le rôle de ρ_0 est bien exposé par les expériences numériques. Toutefois, la deuxième forme du terme de relaxation fait montre d'un autre type d'instabilités, comme nous allons le voir par la suite.

Cas $\alpha = 1$: instabilités non linéaires

Pour le cas $\alpha \neq 0$, les analyses ont montré que le système linéarisé est stable vers tout état constant $(\rho^0, u^{eq}(\rho^0))$ pour tout $\rho_0 > 0$. Cependant, les expériences numériques mettent en exergue la capacité du modèle à produire un autre type d'instabilités sous certaines conditions. Ces instabilités sont de type non linéaire et se produisent dans la région dense, comme l'illustre la figure 4.8. Pour ce test, les

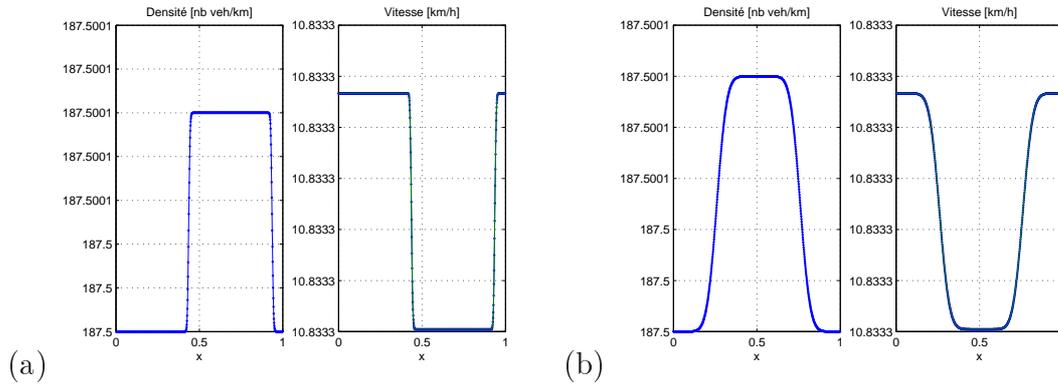


Figure 4.7 – Absence d’instabilités linéaires pour une grande valeur de ρ_0 . Profils de densités et vitesses moyennes, (a) au temps $t = 0.002$ et (b) au temps $t = 0.1$.

résultats sont reproduits pour le cas $\alpha = 1$, avec la condition initiale suivante :

$$\rho^0(x) = \frac{1}{2}\rho_M \text{ pour } x \in (0, 1/2], \quad (53)$$

$$\rho^0(x) = \frac{3}{4}\rho_M + 10^{-4} \text{ pour } x \in (1/2, 1]. \quad (54)$$

$$u^0(x) = u^{eq}(\rho^0(x)). \quad (55)$$

Ici, $\rho_0 = \rho_M$ et le paramètre de relaxation $\ell(\rho) = \ell_0 \frac{u^{eq}(\rho)}{u_f}$ reste inchangé.

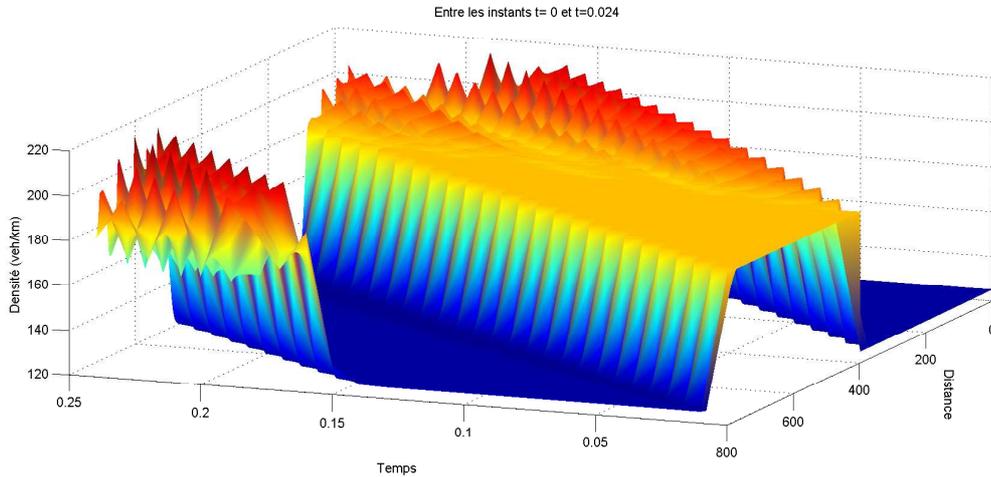


Figure 4.8 – Développement d’instabilités non linéaires dans la région de trafic congestionnée.

Cette caractéristique du modèle s’accorde avec la physique du trafic et les phénomènes non linéaires de type *stop-and-go* (accordéon) qui peuvent apparaître dans un régime congestionné. Or, cet aspect n’est pas retranscrit par le modèle LWR classique, qui maintient le système à l’équilibre et se prive de ces phases de transition. Le développement de ces instabilités non linéaires peut être contrôlé à travers le choix

du paramètre de relaxation, comme l'illustreront les résultats numériques suivants (figure 4.9).

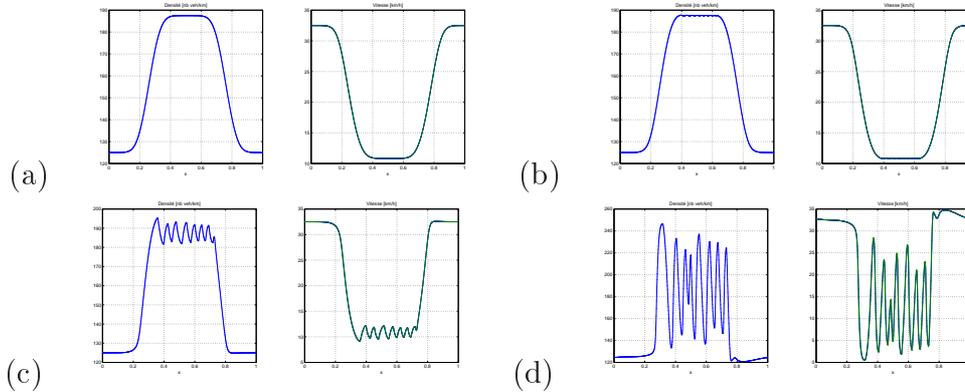


Figure 4.9 – Effet du paramètre de relaxation, cas $\alpha = 1$. Profils des densité et vitesse moyennes au temps $t = 1$, (a) pour $\ell = 10^{-7}$, (b) pour $\ell = 10^{-6}$, (c) pour $\ell = 10^{-5}$ et (d) pour $\ell = 10^{-4}$.

Les solutions sont montrées au temps $t = 0.1$. Le paramètre de relaxation ℓ_0 prend successivement les valeurs 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} et 10^{-4} . Pour $\ell_0 = 10^{-7}$, on trouve une solution discrète stable très proche d'une solution d'équilibre que donnerait le modèle LWR. Pour $\ell_0 = 10^{-6}$, 10^{-5} , on observe le développement de petites oscillations dans la région dense. Enfin, pour une plus grande valeur de notre paramètre ($\ell_0 = 10^{-4}$), les instabilités deviennent plus conséquentes en régime congestionné. À partir de cette expérience, on peut donc voir que le paramètre de relaxation peut lui aussi être ajusté pour donner le taux d'instabilités (non linéaires) souhaité.

4.3.3 Comportement du modèle face aux changements météorologiques

Après avoir observé l'adéquation des solutions numériques du modèle avec les propriétés mathématiques exposées au chapitre 3, nous mettons particulièrement l'accent, au cours des prochaines expériences, sur l'illustration des réponses de ce dernier face aux changements météorologiques, et ce à travers plusieurs cas tests.

Introduction et initialisation des paramètres

Après l'illustration des propriétés du modèle en termes d'instabilités linéaires et non linéaires, il s'agit de montrer la pertinence de l'intégration des effets météorologiques dans ce dernier. Pour ce faire, nous proposons une initialisation avec une fonction en créneau. Or, au lieu de faire varier les profils de densités avec une fonction constante par morceaux de part et d'autre de la discontinuité, c'est ici le paramètre μ d'intensité de la pluie qui agira en lieu et place de la densité initiale (fonction $\mu(x)$ en créneau). La section de 1 km de long sera initialisée de telle sorte qu'une des deux moitiés sera concernée par des conditions météorologiques pluvieuses. L'impact

d'une pluie fine (1mm/h) sera mis en lumière par les cas-tests, cet impact étant bien sûr plus conséquent pour d'autres valeurs d'intensité. La demi-section pluvieuse sera donc localisée dans la première moitié de la section ($x < 0.5$) ou pour la seconde moitié selon les cas ($x > 0.5$), comme le montre la figure 4.10. Les deux types d'initialisation permettront d'observer les variations des solutions produites par le modèle pour deux situations : un flot de véhicules entrant ou quittant une section (la présence de la pluie sera signifiée par des courbes en gras sur l'ensemble des figures suivantes).

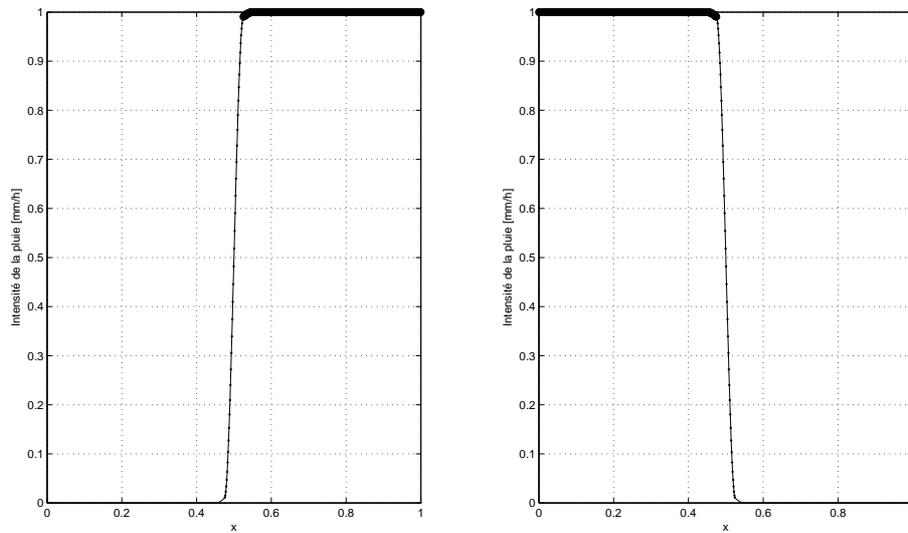


Figure 4.10 – Initialisation d'un créneau de pluie en espace : le front pluvieux est localisé soit sur l'ensemble de la deuxième partie de la section, soit sur la première

Pour tous les cas-tests présentés par la suite, la valeur de α a été maintenue à 1 pour conserver la stabilité linéaire du modèle inconditionnellement. Dans un premier temps, la valeur de ℓ_0 a été fixée à 10^{-8} , permettant de neutraliser le développement éventuel d'instabilités non linéaires et de se focaliser ainsi sur l'impact météorologique. 2000 points de discrétisation ont été simulés avec $\rho_0 = \rho_M = 170$. Le lecteur remarquera un changement dans la valeur de ρ_M , qui a été effectué par souci de consistance avec le diagramme fondamental paramétré par la météorologie, construit à partir de données empiriques. Le nombre CFL est quant à lui égal à 0.45 (tout changement dans ces paramètres sera éventuellement précisé au cas par cas).

Après initialisation du paramètre météorologique, les conditions initiales vont résider dans une fonction ρ^0 constante sur l'ensemble de la section. Cette densité initiale peut se situer dans un régime dense (cas 1) ou fluide (cas 2), mais également dans un régime de type différent selon la météorologie, ce qui donnera lieu à des situations plus complexes (cas 3). Nous étudierons un cas stationnaire pour résumer la variété des situations rencontrées et leurs interprétations (cas 4). Par la suite, la modélisation hybride sera introduite avec l'observation de l'évolution des distributions de temps inter-véhiculaires au cours des expériences (cas 5) tandis que

l'influence d'un terme de relaxation dépendant de la météorologie sera démontrée pour conclure ces simulations (cas 6).

Cas 1 : régime de trafic dense

Pour le cas 1, la densité est initialisée à

$$\frac{\rho_c^{sec} + \rho_M}{2}, \quad (56)$$

où ρ_c^{sec} correspond à la densité critique lors de conditions météorologiques normales (temps sec), c'est-à-dire à la densité séparant les régimes fluides et congestionnés. La figure 4.11 montre la nature des solutions au temps $t = 0.015$ lorsque les véhicules entrent dans une section pluvieuse sur la deuxième moitié de la section. La discontinuité du niveau de pluie a généré une onde de choc, créée par la dynamique du modèle. Ensuite, le flot revient vers la vitesse d'équilibre sous des conditions pluvieuses, qui se trouve donc réduite par rapport aux conditions initiales.

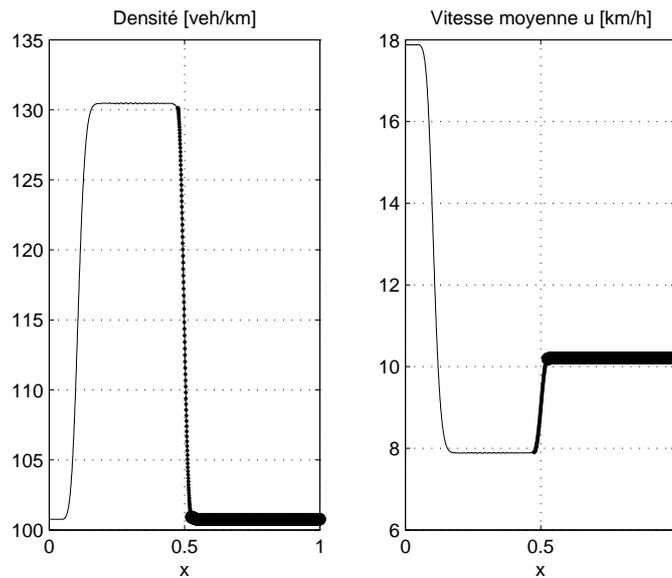


Figure 4.11 – Régime dense : flot de véhicules entrant dans une section pluvieuse. Profils de densités et vitesses moyennes au temps $t = 0.015$

Au regard de la localisation de l'événement pluvieux, la figure 4.12 montre l'évolution des variables du flot quand la pluie est initialisée pour la première moitié de la section seulement.

Les solutions sont bien en accord avec le cas précédent. Un choc est créé avant un retour vers la vitesse d'équilibre sous des conditions normales, qui est plus grande que la vitesse observée dans la première moitié de la section pour une même densité. D'un point de vue de la physique du trafic et du comportement des conducteurs lors de conditions pluvieuses, les solutions décrites par le modèle laissent penser que le flot accélère assez franchement en sortant de la zone de pluie avant de retourner,

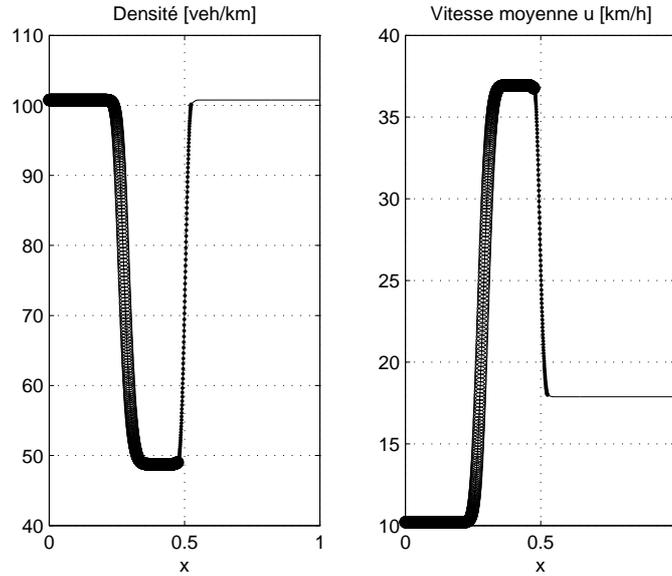


Figure 4.12 – Régime dense : flot de véhicules sortant d’une section pluvieuse. Profils de densités et vitesses moyennes au temps $t = 0.015$

au gré des interactions fortes entre véhicules par régime dense, vers une vitesse d’équilibre réduite (moins de 20 km/h).

Cas 2 : régime fluide.

Un régime fluide (*free flow regime*) se caractérise par le peu d’interactions entre les véhicules, qui peuvent ainsi se déplacer à la vitesse désirée (vitesse libre ou *free flow speed*) u_f . Dans ce deuxième cas-test, on donne à la densité la valeur

$$\rho^0 = \frac{\rho_c^{pluie}}{2}, \quad (57)$$

où ρ_c^{pluie} correspond à la densité critique du diagramme fondamental pour l’intensité de pluie 1 mm/h .

La figure 4.13 montre bien le passage de conditions sèches à pluvieuses dans le régime fluide. En particulier, la vitesse libre passe de $u_f^{sec} = 114.3$ à $u_f^{pluie} = 103.5$.

Dans le cas inverse, l’arrêt de la pluie à la moitié de la section mène logiquement à l’adaptation de la vitesse du flot à des conditions plus favorables. La vitesse du flot tend alors vers la vitesse libre correspondant à des conditions de conduite et un niveau de service optimaux, $u_f^{sec} = 114.3$ (figure 4.14).

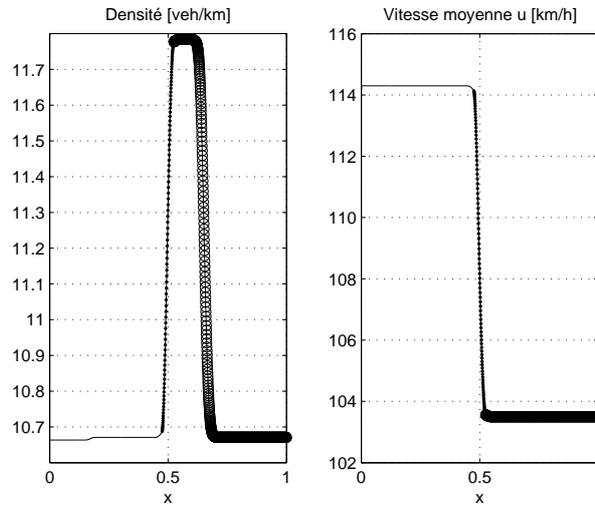


Figure 4.13 – Régime fluide : flot de véhicules entrant dans une section pluvieuse. Profils de densités et vitesses moyennes au temps $t = 0.015$

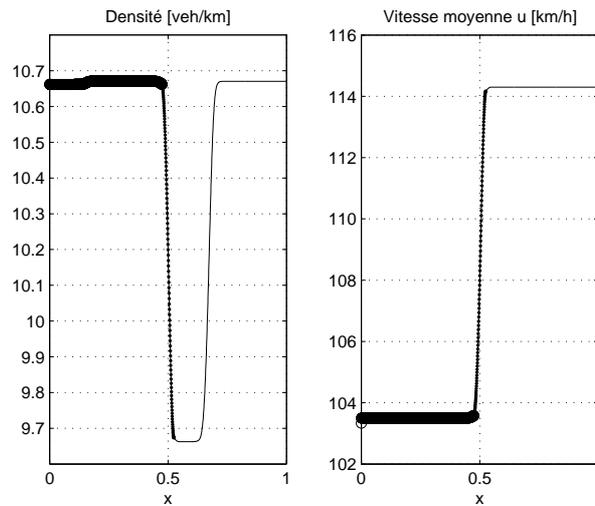


Figure 4.14 – Régime fluide : flot de véhicules sortant d'une section pluvieuse. Profils de densités et vitesses moyennes au temps $t = 0.015$

Cas 3 : quand les changements météorologiques induisent des changements de régime

Dans ce cas test, à partir d'une densité initiale particulière, les changements météorologiques entraînent un passage d'un régime fluide à un régime dense et inversement. En effet, si la densité initiale est choisie entre les deux densités critiques des deux régimes considérés, *i.e.*

$$\rho^0 = \frac{\rho_c^{pluie} + \rho_c^{sec}}{2}, \quad (58)$$

alors le changement météorologique mènera à un changement de régime à l'équilibre, c'est-à dire, dans notre cas, au passage d'un régime fluide à congestionné (resp. congestionné à fluide), en passant d'un temps sec à pluvieux (resp. pluvieux à sec) (figure 4.15).

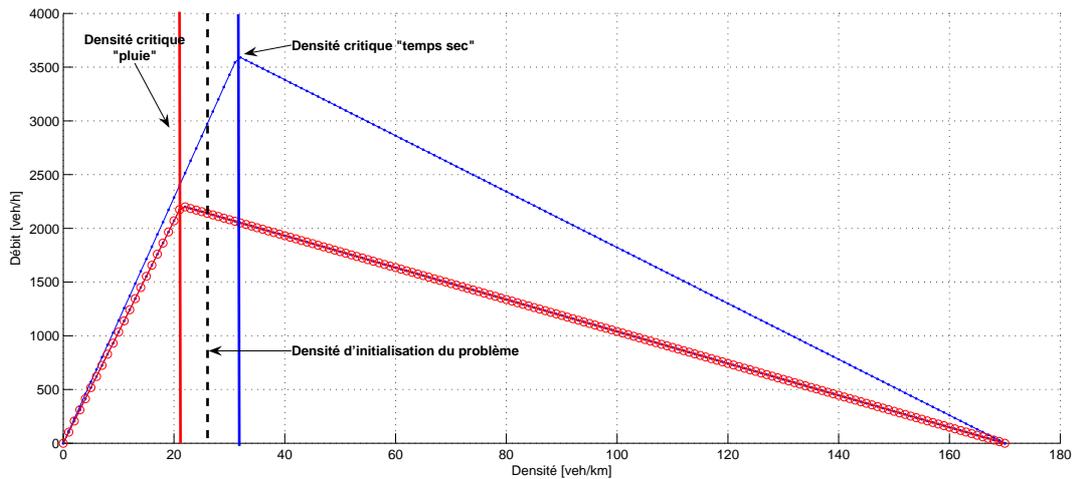


Figure 4.15 – Initialisation d'une densité entre les deux densités critiques : changements de régimes de trafic et météorologiques

La figure 4.16 montre la nature des solutions pour un flot de véhicules entrant dans une seconde moitié de section affectée par des conditions pluvieuses. Un choc se forme à l'endroit de la discontinuité météorologique avant que le flot ne retrouve sa vitesse d'équilibre correspondant à un régime congestionné (environ 80 km/h).

La figure 4.17, elle, représente le cas opposé : un simple arrêt de la pluie entraîne un changement de diagramme fondamental mais aussi de régime : le flot passe donc d'un régime congestionné à fluide. On peut ainsi penser que l'arrêt de la pluie peut, dans un cas réel, entraîner ce genre de phénomène : les véhicules, moins influencés par une météorologie dégradée, augmentent leur vitesse de manière à décongestionner peu à peu la section et atteindre un régime fluide.

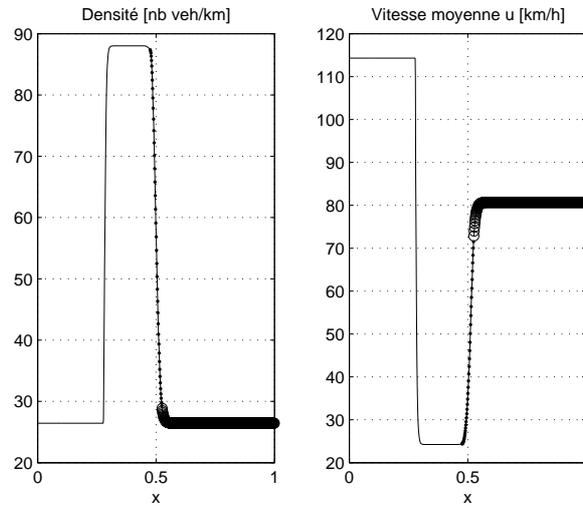


Figure 4.16 – Flot de véhicules entrant dans une section pluvieuse : passage d'un régime fluide à un régime dense. Profils de densité et vitesse moyenne au temps $t = 0.015$

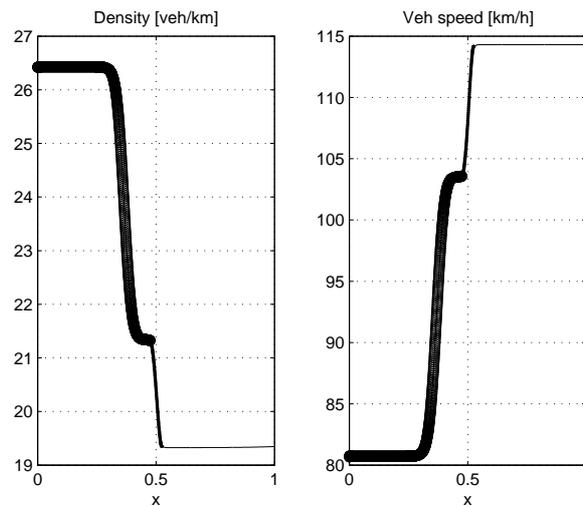


Figure 4.17 – Flot de véhicules sortant d'une section pluvieuse : passage d'un régime dense à un régime fluide. Profils de densité et vitesse moyenne au temps $t = 0.015$.

Cas 4 : solution stationnaire

Le cas 4 correspond à une solution stationnaire avec

$$\partial_t q = 0. \quad (59)$$

$$q_0 = 1035 \text{ veh/h}. \quad (60)$$

Pour ce cas test, l'initialisation de la section pluvieuse a été modifiée pour couvrir

plusieurs cas de figure et prend une forme plus centrée autour de la mi-section, comme le montre le graphique 4.18 :

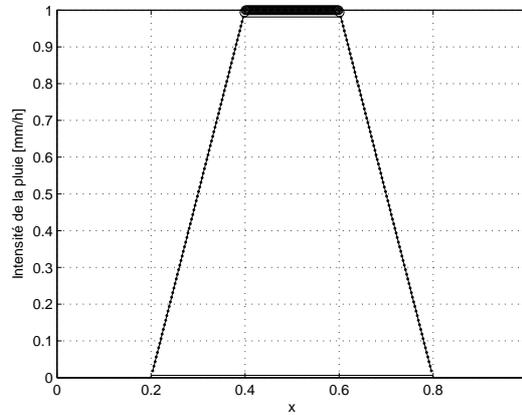


Figure 4.18 – Cas stationnaire : initialisation d'un front pluvieux centré.

Pour ce cas stationnaire, la densité est initialisée de telle sorte que la fonction q_0 reste constante. Ainsi la fonction ρ^0 prend les valeurs adéquates et par rapport à l'initialisation du front météorologique, on peut imaginer sur la figure 4.19 que l'on va se déplacer de la gauche vers la droite, croisant plusieurs diagrammes fondamentaux correspondant à plusieurs régimes.

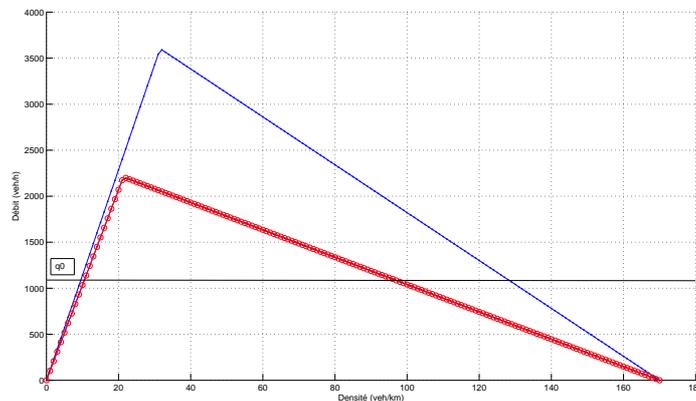


Figure 4.19 – Cas stationnaire : le débit est constant et la densité et la météorologie sont initialisées de façon à se déplacer de la gauche vers la droite

Ici, les solutions numériques se maintiennent tout au long des itérations et la stabilité du schéma est directement observée sur des figures complètement statiques au fil des itérations numériques. Ce cas stationnaire permet d'observer le plus simplement possible les changements de solutions en fonction du trajet "à travers" les diagrammes fondamentaux, sur un seul niveau de débit q_0 , mais aussi de lier ces changements à la physique sous-jacente du trafic (figure 4.20).

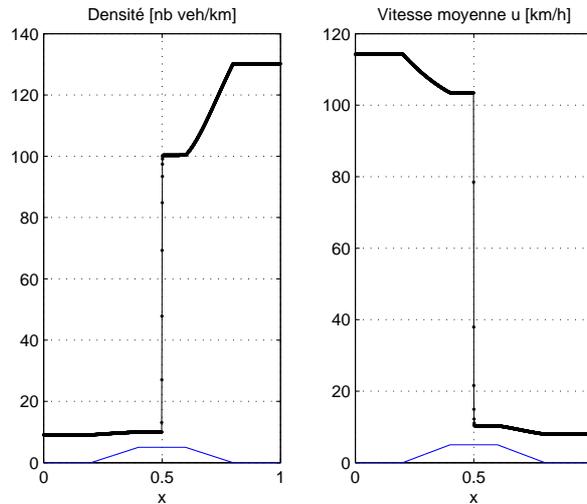


Figure 4.20 – Solutions numériques du cas stationnaire.

Sur la figure 4.20, on peut voir différentes situations qui se succèdent : de $x = 0$ à $x = 0.2$, le temps est sec, le flot se situe sur un diagramme fondamental "sec" en régime fluide ($\rho=9$ veh/km). A partir de $x = 0.2$ et jusqu'à $x = 0.4$, la pluie augmente progressivement pour atteindre peu à peu l'intensité de 1 mm/h : le flot se déplace d'un diagramme "temps sec" à un diagramme "pluie fine 1mm/h", les états intermédiaires étant obtenus grâce au DF paramétré par le paramètre continu $\mu \in [0, 1]$. La densité augmente légèrement et la vitesse du flot baisse. De $x = 0.4$ à $x = 0.5$, les valeurs se stabilisent. A $x = 0.5$, un changement de régime brutal est imposé : on passe à l'intérieur du diagramme fondamental "pluie" du régime fluide au régime congestionné pour une même valeur initiale du débit. La densité augmente brutalement tandis que la vitesse fait le chemin inverse, descendant directement sous les 10 km/h. Notons la robustesse du modèle et du schéma face à ce changement soudain. A partir de $x = 0.6$, le niveau de pluie redescend doucement et on glisse d'un diagramme fondamental "pluie 1mm/h" à un diagramme fondamental "sec" toujours en régime congestionné. Il est intéressant de remarquer qu'ici, en régime dense, dans ce cas stationnaire, l'arrêt de la pluie peut entraîner une augmentation de la densité et ainsi une baisse des vitesses, ce qui peut paraître contre-intuitif. En fait, on peut penser par rapport aux résultats sur les temps intervéhiculaires que les conducteurs réduisent leur TIVs face à l'arrêt de la pluie, entraînant ainsi une augmentation de la densité et, *de facto*, une baisse de la vitesse moyenne ressortie par le modèle. Ceci est en accord avec un comportement qu'aurait le modèle LWR, comme nous l'avons montré au chapitre 3.

Cas 5 : Modélisation mesoscopique des temps inter-véhiculaires

Le modèle macroscopique original, à deux équations, peut être couplé à une équation additionnelle sur les temps inter-véhiculaires, formant ainsi un système hybride méso-macro qui permet, en parallèle, de représenter l'évolution des dis-

tributions de temps intervéhiculaires au cours des itérations et en fonction de la météorologie. L'équation des TIV a été discrétisée classiquement à partir de sa formulation analytique Lagrangienne. Par exemple, pour une certaine initialisation d'un front de pluie, la figure 4.21 montre les lignes de niveau des TIV au temps $t = 0.015$:

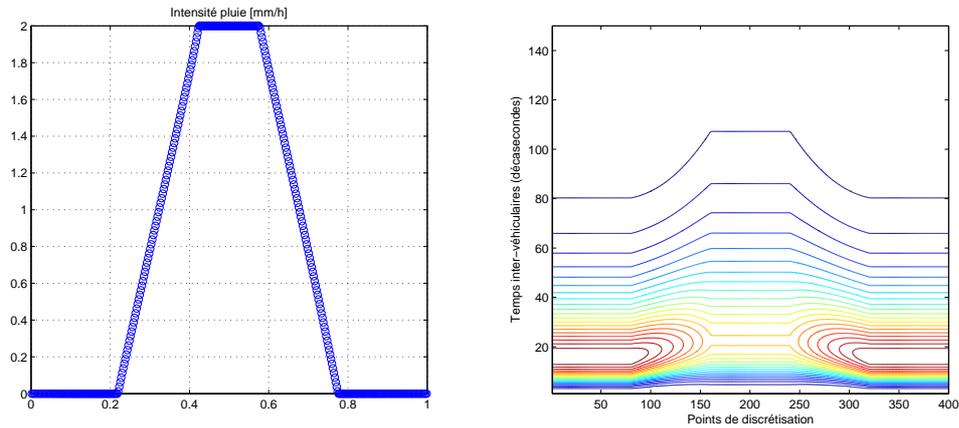


Figure 4.21 – Initialisation du front de pluie et profils de temps inter-véhiculaires en espace au temps $t = 0.015$.

Il est ainsi possible d'observer l'évolution des distributions de TIV au cours du temps. Pointons notamment les profils de densités de temps inter-véhiculaires courts (1.5 secondes) et longs (5 secondes) sur la section pour ce même temps $t = 0.015$. Les résultats sont bien en accord avec les études empiriques du chapitre 2. La densité des temps intervéhiculaires courts baisse avec l'apparition de la pluie, et inversement, comme le confirme la figure 4.22.

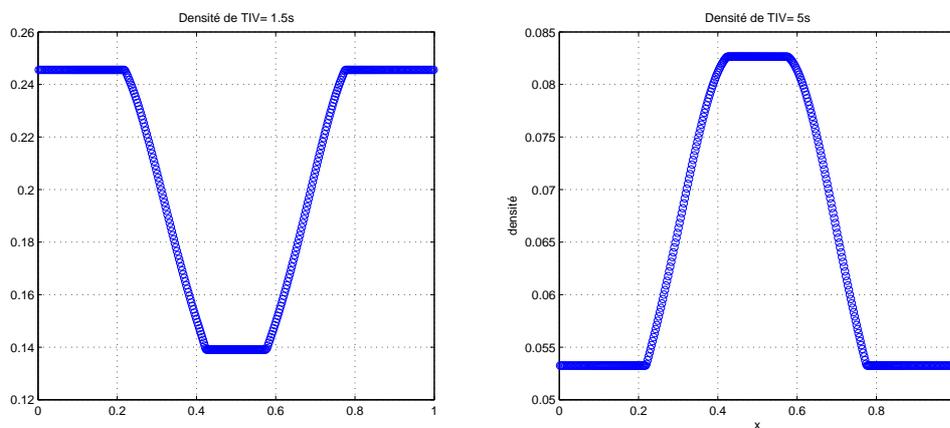


Figure 4.22 – Profils de TIV courts (1.5s) et moyens (5s) sur la section au temps $t = 0.015$

Cas 6 : temps de relaxation et météorologie

L'addition d'une deuxième équation à la place de la relation phénoménologique simple du diagramme fondamental permet également de rajouter une partie non homogène de retour vers l'équilibre. Ce retour vers l'équilibre dépend d'un certain temps de relaxation. Au regard de la modélisation des effets météorologiques, il est raisonnable de penser que ce temps de relaxation du flot de véhicules vers la vitesse d'équilibre dépend lui-même des conditions météorologiques. Le début d'une période pluvieuse pourrait se modéliser par un temps de relaxation plus long, traduisant le fait que l'ensemble des conducteurs prenne du temps à s'adapter à la dégradation des conditions de circulation. Cette interprétation semble naturelle mais reste cependant difficile à quantifier par des études concrètes, hors simulateur de conduite. Dans tous les cas, il semble que seuls des modèles à deux équations avec un terme de relaxation pourraient être en mesure de reproduire ce phénomène complexe. Partant d'un cas concret, on peut raisonnablement imaginer une section interurbaine, très fréquentée aux heures aux pointes, où les conducteurs auraient dans ce régime dense un comportement très proche de l'équilibre en conditions normales. Une zone de pluie est modélisée sur la deuxième moitié de la section, comme pour le cas test 1, et $\rho^0 = 120$ veh/km. Le comportement déterministe des conducteurs peut se traduire par un terme ℓ_0 très faible (10^{-8}), que l'on ne fait pas varier selon les conditions météorologiques dans un premier temps. Les solutions produites sont donc dans ce cas très proches de celles obtenues pour le premier cas test, comme le montre la figure 4.23 :

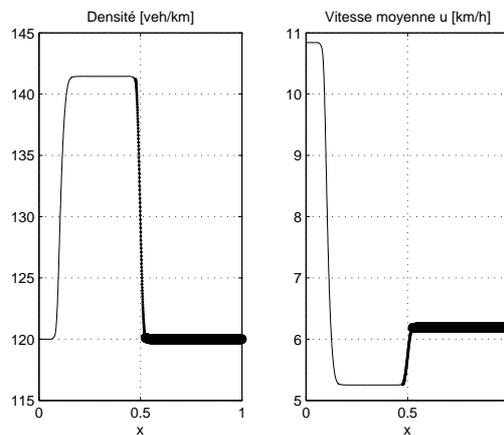


Figure 4.23 – Terme de relaxation faible : profils de densités et vitesses au temps $t = 0.015$.

En incorporant une dépendance en μ dans le terme de relaxation, il est possible de modéliser le fait que les conducteurs montrent un comportement plus stochastique en rentrant dans la zone pluvieuse. Pour cet exemple, le temps de relaxation est une fonction croissante de μ , qui atteint 3.6 secondes quand $\mu = 1$ mm/h. Cette modification entraîne le développement d'instabilités non linéaires de type ondes *stop-and-go* dans la région dense, comme le montre la figure 4.24 à deux instants

successifs :

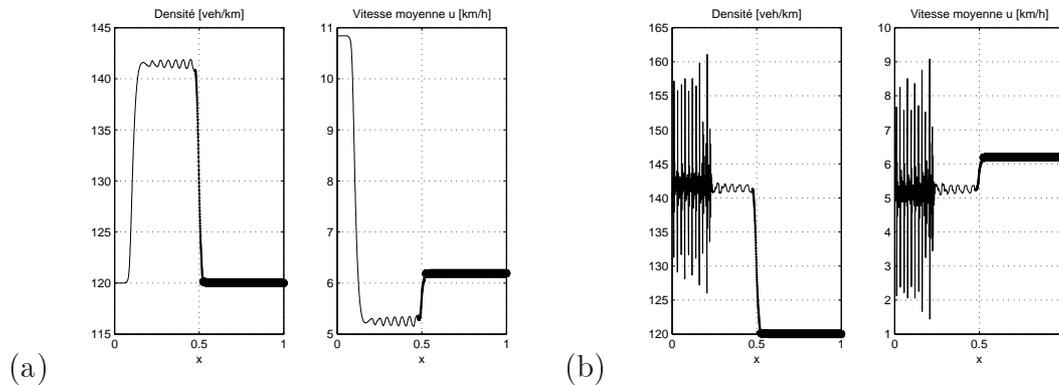


Figure 4.24 – Temps de relaxation dépendant de la météo : développement d’instabilités non linéaires dans la région dense. Profils de densités et vitesses moyennes, (a) au temps $t = 0.015$ et (b) au temps $t = 0.03$.

Ainsi, l’interprétation physique de ces solutions serait simple : adoptant un comportement déterministe et relativement fluide en temps normal, les conducteurs seraient perturbés par l’apparition de la pluie et leur conduite en régime dense se traduirait par un plus grand nombre d’interactions et de rapprochements entre eux, laissant apparaître des phénomènes d’accordéon bien connus des usagers du périphérique parisien. Cette intégration de la météorologie dans le terme de relaxation semble prometteuse et peut contribuer à justifier l’emploi de modèles à deux équations. Cependant, des résultats complémentaires sur les valeurs à donner à ces temps de relaxation et le comportement réel face à la météorologie d’un point de vue de la psychologie du conducteur seraient aussi profitables à de futurs développements.

4.4 Bilan des expériences numériques

Dans ce chapitre, la discrétisation numérique du système macroscopique s’est appuyée sur une méthode à pas fractionnaire, le *splitting* de Strang, d’ordre 2 en temps, qui permet de traiter successivement la partie convective et le terme source. Pour la partie convective du système, nous avons adopté une méthode de type Lagrange-projection, qui combine les avantages d’une approche Lagrangienne et la robustesse d’une approche Eulérienne. L’approche Lagrange+remap consiste à reprojeter, après une étape Lagrange classique où les mailles évoluent, la solution convectée sur la grille Eulérienne initiale. Cette projection conservative s’effectue à travers un bilan de masse et de quantité de mouvement. Cette approche de Lagrange+remap semble particulièrement propice à une application au trafic routier avec des capteurs géoréférencés (Eulériens). La formulation en Lagrange conduit à un schéma numérique d’écriture très simple, ne faisant pas intervenir de décomposition propre du système et de solveurs de Riemann aux interfaces. De plus, les résultats numériques ont confirmé la stabilité des solutions obtenues et les bonnes

propriétés du modèle. S'il était attendu que des solutions physiquement cohérentes apparaissent face à des initialisations classiques en créniaux de densité, la question des instabilités a constitué un aspect particulièrement satisfaisant des aptitudes du modèle. Dans un premier temps, les résultats théoriques sur la stabilité linéaire ont pu être validés numériquement. Pour la première forme du terme de relaxation, $\alpha = 0$, des instabilités linéaires se développent dans la région dense, qui peuvent être contenues ou maîtrisées par la valeur donnée à la constante ρ_0 . Pour $\alpha = 1$, des instabilités non linéaires se développent dans la région dense, faisant apparaître des phénomènes d'onde de type *stop-and-go* (accordéon), concordant parfaitement avec la physique du trafic, et incapables d'être reproduits par des modèles plus simples.

Dans un second temps, l'intégration des effets météorologiques dans le modèle a été illustrée par le truchement d'un ensemble de cas-tests. Nous avons observé que les solutions varient pertinemment en fonction des changements météorologiques pour des cas très variés. Le modèle est capable de rendre compte de situations particulières comme le changement de régime de trafic (dense/fluide ou inversement) causé par l'apparition de la pluie. En complément des résultats sur la vitesse et la densité du flot, les profils des distributions de temps intervéhiculaires se sont logiquement montrés en accord avec les résultats statistiques présentés au chapitre 2. Concernant les temps de relaxation et leur dépendance météorologique, ils représentent un aspect stimulant de recherche, qui justifie l'usage d'un modèle du deuxième ordre. Le développement d'un modèle macroscopique à deux équations n'implique d'ailleurs pas de se priver de la simplicité et de la robustesse du modèle LWR. En faisant tendre le temps de relaxation vers zéro, il est tout à fait possible de retrouver au besoin des solutions proches de celles données par le modèle LWR, justifiant du même coup la dérivation d'une hiérarchie de modèles à partir du formalisme Vlasov.

*Vers des applications en ligne :
méthode d'estimation du vecteur
d'état pour le trafic routier.*

Sommaire

5.1	Introduction	126
5.2	Filtrage bayésien : principe et méthodes	127
5.2.1	Formulation du filtre non linéaire optimal	127
5.2.2	Filtre de Kalman et extensions au cas non linéaire	128
5.2.3	Filtrage particulaire	131
5.3	Estimation bayésienne et trafic routier	136
5.4	Méthode de Monte Carlo Séquentielle pour le trafic routier avec intégration de la météorologie	137
5.4.1	Modèle macroscopique du 1er ordre	138
5.4.2	Méthode de Monte Carlo Séquentielle (MCS)	139
5.4.3	Présentation des données du périphérique lyonnais	141
5.4.4	Paramètres du modèle et procédure de détection des erreurs d'esti- mation	142
5.4.5	Résultats avec intégration des effets de la pluie	144
5.5	Conclusion	151

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons orienter notre travail vers de futures applications en ligne pour la gestion du trafic, en développant des méthodes d'estimation pouvant s'intégrer à des outils d'aide à la décision. Comme beaucoup d'applications en traitement du signal, ou en contrôle, le problème de l'estimation de l'état du trafic peut se formuler d'une façon standard. Il consiste à estimer un vecteur d'état x en connaissant le vecteur des observations y au temps t . À partir du vecteur d'état et des observations, il est possible de

- non seulement **lisser**, c'est-à-dire d'estimer le vecteur d'état pour un temps $t' = t - T$,
- mais encore de **prédire**, c'est-à-dire d'estimer un état futur de x pour un temps $t' = t + T$,
- et enfin de **filtrer**, *i.e.* estimer le vecteur d'état au temps $t' = t$.

C'est essentiellement sur la problématique de **filtrage** que se concentrera notre travail dans ce chapitre. Il tentera ainsi de proposer des méthodes d'assimilation de données qui consistent à mettre à jour l'état d'un système par rapport à de nouvelles observations. Le mot filtrage fera plus précisément référence au filtrage statistique bayésien, pour lequel le signal d'intérêt x_t constitue un processus markovien caché, défini par une distribution initiale $p(x_0)$ et une probabilité de transition $p(x_t|x_{t-1})$. L'hypothèse markovienne d'ordre un, qui postule que l'état futur d'un système ne se déduit que du présent, s'applique donc ici au trafic routier. Dès lors, le problème du filtrage bayésien consiste à estimer le vecteur d'état au temps $t + 1$ connaissant les nouvelles observations, à savoir

$$p(x_{0:t+1}|y_{0:t+1}). \quad (1)$$

où les observations y_t sont supposées indépendantes conditionnellement à x_t avec des distributions marginales $p(y_t|x_t)$, $\forall t > 0$.

Dans une deuxième section (5.2), nous présenterons les principes du filtrage bayésien, de même que les principales méthodes qui s'y appliquent. Or, dans le cas du trafic routier, l'application de ces méthodes à l'estimation en temps réel du vecteur d'état constitue une tâche complexe de par les différentes particularités du système dynamique considéré. Le trafic routier s'avère en effet être un phénomène non linéaire, constitué de plusieurs régimes ou modes : congestion, régime fluide, ondes *stop-and-go* etc. Les changements de mode ou de conditions peuvent être dus à la dynamique interne du trafic, mais aussi à des événements extérieurs comme des accidents ou la météorologie. Dans la section 5.3, nous restituerons succinctement un état de l'art de l'application du filtrage bayésien au trafic routier. Cette section introduira également le choix de la méthode utilisée dans nos contributions, à savoir le filtrage particulière. Ces contributions, précisément, seront présentées dans la section 5.4, avec une méthode de filtrage particulière couplée à un modèle du 1er ordre (modèle LWR dans une version discrétisée cellulaire offre/demande). L'originalité de ce travail réside ainsi dans l'intégration des effets météorologiques aux outils d'aide à la décision, comme nous l'illustrerons à partir de données opérationnelles

du périphérique lyonnais. Les résultats, prometteurs nous semble-t-il, ouvrent la voie à de futures applications et développements qui seront évoqués dans la section 5.5.

5.2 Filtrage bayésien : principe et méthodes

5.2.1 Formulation du filtre non linéaire optimal

L'inférence statistique oppose historiquement les deux écoles fréquentiste et bayésienne. Selon les fréquentistes, une loi de probabilité inconnue ne peut être déterminée qu'à partir de fréquences observées au cours d'événements répétés un certain nombre de fois. Les Bayésiens, pour leur part, incluent des considérations *a priori* sur ces probabilités, c'est-à-dire des paramètres supplémentaires en plus de la simple observation des fréquences. L'estimation bayésienne repose sur le fameux théorème de Thomas Bayes, qui exprime une densité de probabilité *a posteriori* $p(A/B)$ comme

$$p(A/B) = \frac{p(B/A) \times p(A)}{p(B)}, \quad (2)$$

où $p(B/A)$ représente la vraisemblance de A . Appliquons cette règle simple à l'estimation d'un processus markovien au temps t , avec un vecteur d'état noté x_t , et défini par une distribution *a priori* $p(x_0)$ et une équation de transition $p(x_t|x_{t-1})$. Les observations y_t sont indépendantes conditionnellement par rapport à x_t , et sont de distribution marginale $p(y_t|x_t)$. Le problème du filtrage bayésien consiste ainsi à déterminer la densité conditionnelle $p(x_{t+1}|y_{t+1})$, appelée filtre. En appliquant la règle de Bayes à cette probabilité, il s'ensuit que

$$p(x_{t+1}|y_{t+1}) = \frac{p(y_{t+1}|x_{t+1})p(x_{t+1})}{p(y_{t+1})}, \quad (3)$$

ou encore

$$p(x_{t+1}|y_{t+1}) = p(x_t|y_t) \times \frac{p(y_{t+1}|x_{t+1})p(x_{t+1}|x_t)}{p(y_{t+1}|y_t)}. \quad (4)$$

Une autre formulation de cette équation récursive se présente sous la forme du problème de filtrage non linéaire optimal que l'on décompose généralement en deux étapes, prédiction et correction. L'étape de prédiction fait intervenir la loi de transition $p(x_{t+1}|x_t)$, tandis que l'étape de correction intègre les nouvelles observations y_{t+1} et la loi de vraisemblance locale $p(y_{t+1}|x_{t+1})$. Ainsi on a

$$p(x_t|y_t) \xrightarrow{\text{Prediction}} p(x_{t+1}|y_t) \xrightarrow{\text{Correction}} p(x_{t+1}|y_{t+1}). \quad (5)$$

À l'étape de prédiction le filtre $p(x_{t+1}|y_t)$ se déduit du filtre $p(x_t|y_t)$ selon la formule

$$p(x_{t+1}|y_t) = \int_{\mathbb{R}^n} (p(x_{t+1}|x_t)p(x_t|y_t)) dx_t, \quad (6)$$

tandis qu'à l'étape $t + 1$, le filtre $p(x_{t+1}|y_{t+1})$ se déduit de $p(x_{t+1}|y_t)$ selon la formule de correction

$$p(x_{t+1}|y_{t+1}) = \frac{p(y_{t+1}|x_{t+1})p(x_{t+1}|y_t)}{\int_{\mathbb{R}^n} p(y_{t+1}|x_{t+1})p(x_{t+1}|y_t) dx_{t+1}}. \quad (7)$$

Deux cas se dégagent selon qu'on puisse résoudre explicitement ou non les formulations précédentes. Dans le cas linéaire gaussien, le filtre de Kalman peut être appliqué pour obtenir une solution explicite. Malheureusement, dans la plupart des cas, l'hypothèse de linéarité et/ou de normalité n'est pas possible : les formulations récursives présentées ci-dessus ont une valeur avant tout théorique, elles requièrent l'évaluation d'intégrales trop complexes, en grande dimension, pour être réellement applicables. Dès lors, on peut proposer diverses techniques d'approximation de la solution, au sein desquelles se distinguent deux grandes familles, que nous détaillerons. La première famille se fonde sur le filtre de Kalman et ses extensions au cas non linéaire et non gaussien. La seconde famille, présentée dans un deuxième temps, repose sur l'application des méthodes d'intégration numérique, dites méthodes de Monte Carlo, au filtrage bayésien. On rencontre aussi, concernant les méthodes de cette famille, les dénominations de filtrage particulière ou méthodes de Monte Carlo séquentielles.

5.2.2 Filtre de Kalman et extensions au cas non linéaire

Filtre de Kalman

Dès les années 60, Kalman a présenté les fondements d'une méthode de filtrage linéaire qui aura une répercussion majeure dans le domaine du traitement du signal [77]. Le point de départ est un modèle linéaire et gaussien

$$x_{t+1} = F_t x_t + G_t W_t, \quad t \geq 0, \quad (8)$$

$$y_t = H_t x_t + V_t, \quad t \geq 1, \quad (9)$$

où la distribution initiale x_0 est gaussienne de loi $N(E[x_0], Q_0)$ tout comme W_t et V_t de lois respectives $N(0, Q_t^W)$ et $N(0, Q_t^V)$ avec $Q_t^V > 0$ pour une bonne définition du filtre. De plus les lois de x_t , conditionnellement aux précédentes observations, sont gaussiennes de telle sorte que

$$(x_t | y_{1:t}) \sim N(\hat{x}_t, R_t), \quad (10)$$

$$(x_t | y_{1:t-1}) \sim N(\hat{x}_t^-, R_t^-), \quad (11)$$

avec les moyennes \hat{x}_t et \hat{x}_t^- telles que

$$\hat{x}_t = E[x_t | y_{1:t}], \quad (12)$$

$$\hat{x}_t^- = E[x_t | y_{1:t-1}], \quad (13)$$

et les variances R_t et R_t^- telles que

$$R_t = E[(x_t - \hat{x}_t)(x_t - \hat{x}_t)^T], \quad (14)$$

$$R_t^- = E[(x_t - \hat{x}_t^-)(x_t - \hat{x}_t^-)^T]. \quad (15)$$

Il s'agit donc de calculer $p(x_t | y_{1:t})$ à partir de ces hypothèses de base. Comme pour le filtrage optimal, le filtre de Kalman applique une étape de prédiction pour

calculer $p(x_t|y_{1:t-1})$ puis une étape de correction avec la nouvelle observation $y_{1:t}$ et l'équation d'observation pour calculer $p(x_t|y_{1:t})$. En théorie du contrôle, on parlerait ainsi d'une boucle de retroaction réintroduisant la valeur déterminée par le filtrage dans le contrôle : l'étape de projection consiste à projeter un estimé de l'état à la prochaine estimation tandis que l'étape de correction corrige cet estimé à partir de la nouvelle observation.

Algorithme 1 : Filtre de Kalman

début

Initialisation

On part des hypothèses gaussiennes précédentes pour $p(x_t|y_{1:t-1})$ et $p(x_t|y_{1:t})$ et on a

$$\hat{x}_0 = E[x_0] \text{ et } R_0 = Q_0 = Cov(x_0). \quad (16)$$

Prédiction

$$\hat{x}_t^- = F_{t-1} \hat{x}_{t-1}, \quad (17)$$

$$R_t^- = F_{t-1} R_{t-1} F_{t-1}^T + G_{t-1} Q_{t-1}^W G_{t-1}^T. \quad (18)$$

Correction

$$K_t = R_t^- H_t^T [H_t R_t^- H_t^T + Q_t^V]^{-1}, \quad (19)$$

$$\hat{x}_t = \hat{x}_t^- + K_t [y_t - (H_t \hat{x}_t^-)], \quad (20)$$

$$R_t = [I - K_t H_t] R_t^-. \quad (21)$$

fin

Le terme K_t est un terme de gain. Il est intéressant de noter que les covariances sont posées *a priori* et ne dépendent pas des y_t . Le gain K_t se détermine en fonction de la confiance mise dans le modèle par rapport à celle accordée aux mesures. Parmi tous les gains possibles, c'est bien celui qui minimise la variance qui est choisi. Le filtre de Kalman, qui ne s'applique qu'au cas linéaire, connut sa première et célèbre utilisation dans le cadre du projet Apollo, auquel il fournit des prédictions de trajectoires. La plupart des phénomènes physiques de la nature étant non linéaires, des extensions au filtre de Kalman initial furent rapidement proposées.

Filtre de Kalman étendu

De nombreux systèmes non linéaires se présentent sous la forme suivante :

$$x_{t+1} = f(x_t) + g(x_t)W_t, \quad (22)$$

$$y_t = h(x_t) + V_t. \quad (23)$$

où W_t , V_t et x_0 sont supposées indépendantes et les espérances et matrices de covariances $E[W_t] = 0$, $cov[W_t] = Q_t^W$, $E[V_t] = 0$ et $cov[V_t] = Q_t^V$. L'idée du filtre de Kalman étendu est de linéariser le système précédent autour de l'estimée courante et d'appliquer la technique initiale du filtre de Kalman. L'algorithme peut alors être résumé de la sorte :

Algorithme 2 : Filtre de Kalman étendu.

début

Initialisation

$$\hat{x}_0 = E[x_0] \text{ et } R_0 = Q_0 = Cov(x_0). \quad (24)$$

x_0 n'est pas nécessairement gaussien

pour $t=1$ à ... **faire**

Prédiction

$$F_{t-1} = \nabla f(x_{t-1}^-), \quad (25)$$

$$\hat{x}_t^- = f(x_{t-1}^-), \quad (26)$$

$$R_t^- = F_{t-1}R_{t-1}F_{t-1}^T + G_{t-1}Q_{t-1}^W G_{t-1}^T. \quad (27)$$

Correction

$$H_t = \nabla h(\hat{x}_t^-), \quad (28)$$

$$K_t = R_t^- H_t^T [H_t R_t^- H_t^T + Q_t^V]^{-1}, \quad (29)$$

$$\hat{x}_t = \hat{x}_t^- + K_t [y_t - h(\hat{x}_t^-)], \quad (30)$$

$$R_t = [I - K_t H_t] R_t^-. \quad (31)$$

fin

fin

Pour la phase de prédiction, l'équation d'état de départ est linéarisé autour de x_{t-1}^- :

$$x_t \cong f(x_{t-1}^-) + F_{t-1} (x_{t-1} - x_{t-1}^-) + G_{t-1} W_{t-1}, \quad (32)$$

où $F_{t-1} = \nabla f(x_{t-1}^-)$ et $G_{t-1} = g(x_{t-1}^-)$. Ainsi, on peut déduire $\hat{x}_t^- = f(\hat{x}_{t-1}^-)$ et l'expression de R_t^- résultante. Pour l'étape de correction, l'équation d'observation est linéarisée autour de l'estimée courante \hat{x}_t^- , pour obtenir

$$y_t = h(\hat{x}_t^-) + H_t (x_t - \hat{x}_t^-) + V_t \quad (33)$$

où $H_t = \nabla h(\hat{x}_t^-)$. Le filtre de Kalman est ensuite appliqué pour donner \hat{x}_t .

Filtre de Kalman inodore (*unscented Kalman filter*)

Le but du filtre de Kalman inodore est de se passer des calculs de gradient présents dans le filtre de Kalman étendu. Cette méthode introduite à la fin des années 1990 repose sur le principe de la transformée inodore, proposée par Julier et Uhlmann [76]. La transformée inodore suppose que l'on dispose d'une formule de quadrature au second ordre $(w^i, x^i)_{i=1:N}$ pour le vecteur d'état x avec des poids positifs $w^{1:N}$ pour un ensemble de points $x^{1:N}$ de \mathfrak{R}^n appelés σ -points tels que

$$\sum_{i=1}^N w^i x^i = E[x] \text{ et } \sum_{i=1}^N w^i (x^i - E[x]) (x^i - E[x])^T = cov(x). \quad (34)$$

Alors, on peut dire que les $(w^i, y^i)_{i=1:N}$ avec $y^i = f(x^i)$ sont une formule de quadrature pour $y = f(x)$, *i. e.*

$$\sum_{i=1}^N w^i y^i = E[y] \text{ et } \sum_{i=1}^N w^i (y^i - E[y]) (y^i - E[y])^T = cov(y). \quad (35)$$

Les poids sont normalisés de telle sorte que $\sum_i w^i = 1$. Le choix des σ -points est détaillé dans [76]. A partir du bon choix des σ -points, les étapes de prédiction et de correction deviennent les suivantes :

Parmi les atouts du filtre de Kalman inodore, la transformée inodore suscite moins de biais dans les estimations des moyennes et covariances que la linéarisation du filtre de Kalman étendu. La supériorité de telle ou telle méthode par rapport à l'autre dépend finalement de ses applications. Si le filtre de Kalman inodore est plus précis et plus facile à implémenter dans certains contextes (estimation précise de l'état, économie de calculs de jacobiens, voir [142]), d'autres études comparatives ne notent pas de différences significatives pas rapport au filtre de Kalman étendu, qui peut très bien s'adapter à un grand nombre de problèmes concrets pour lesquels des linéarisations sont possibles [91]. Parmi les autres extensions du filtre de Kalman, les filtres de Kalman d'ensemble sont très populaires pour des problèmes d'assimilation de données en grande dimension. Il s'agit d'approcher le calcul des matrices de covariance, forcément coûteux, par des méthodes de quadrature de type Monte Carlo qui vont générer un ensemble d'états.

5.2.3 Filtrage particulière

Le filtre de Kalman et ses extensions telles que le filtre de Kalman étendu ou le filtre de Kalman inodore, reposent sur des approximations analytiques du problème de filtrage optimal bayésien, comme nous l'avons introduit au début de ce chapitre. Les méthodes de filtrage particulière font quant à elles partie des méthodes d'intégration numériques qui approchent par des solutions numériques la densité de probabilité de l'état. Une solution numérique consiste à utiliser une méthode d'intégration de type Monte Carlo. Les méthodes de filtrage particulière, nommées également méthodes de Monte Carlo séquentielles, reposent sur ce formalisme.

Algorithme 3 : Filtre de Kalman inodore (*unscented Kalman filter*).

début

Prédiction

$$\sigma_{t-1} = (w_{t-1}^i, x_{t-1}^i) \text{ } \sigma \text{ - points pour } N(x_{t-1}^{\hat{-}}, R_{t-1}), \quad (36)$$

$$\hat{x}_t^- = \sum_{\sigma_{t-1}} w_{t-1}^i f_t(x_{t-1}^i), \quad (37)$$

$$R_t^- = \sum_{\sigma_{t-1}} w_{t-1}^i \left[f_t(x_{t-1}^i) - \hat{x}_t^- \right] \left[f_t(x_{t-1}^i) - \hat{x}_t^- \right]^T + Q_t^W. \quad (38)$$

Correction

$$\sigma_{t-} = (w_{t-}^i, x_{t-}^i) \text{ } \sigma \text{ - points pour } N(x_{t-}^{\hat{-}}, R_{t-}), \quad (39)$$

$$\hat{y}_{t-} = \sum_{\sigma_{t-}} w_{t-}^i h_t(x_{t-}^i), \quad (40)$$

$$S_{t-} = \sum_{\sigma_{t-}} w_{t-}^i \left[h_t(x_{t-}^i) - \hat{y}_{t-} \right] \left[h_t(x_{t-}^i) - \hat{y}_{t-} \right]^T + Q_t^V, \quad (41)$$

$$U_{t-} = \sum_{\sigma_{t-}} w_{t-}^i \left[x_{t-}^i - \hat{x}_{t-}^- \right] \left[h_t(x_{t-}^i) - \hat{y}_{t-} \right]^T, \quad (42)$$

$$\hat{x}_t = \hat{x}_{t-}^- + U_{t-} [S_{t-}]^{-1} \left[y_t - \hat{y}_{t-} \right], \quad (43)$$

$$R_t = R_{t-}^- - U_{t-} [S_{t-}]^{-1} [U_{t-}]^T. \quad (44)$$

fin

Méthode de Monte Carlo générale

Si le terme Monte Carlo fait directement référence à un quartier de Monaco et à son casino, théâtre des jeux de hasard en tout genre, c'est à l'année 1733 et à l'expérience de l'aiguille de Buffon que l'on fait généralement remonter l'origine des méthodes dites de Monte Carlo. L'expérience du comte de Buffon consiste à lancer un certain nombre de fois une aiguille sur un parquet composé de planches parallèles d'une certaine largeur, la longueur de l'aiguille étant inférieure à la largeur d'une planche. En comptant le nombre de fois où l'aiguille croise une rainure du parquet, on se rend compte que le quotient par rapport au nombre de lancers totaux dépend de la valeur de π . La valeur de π peut ainsi être déduite par cette première méthode de Monte Carlo. De façon générale, la méthode de Monte Carlo se présente sous la forme de la résolution d'une espérance mathématique

$$E[x] = \int_N g(x)p(x)dx, \quad (45)$$

avec $g(x)$ une fonction quelconque et $p(x)$ une densité de probabilité que l'on suppose

complexe. L'idée est de produire un échantillon de taille N de la loi de $p(x)$, soit

$$p(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x - x^i), \quad (46)$$

puis de construire l'estimateur à partir de la moyenne empirique

$$E[x] = \int_N g(x)p(x)dx \cong \int g(x) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x - x^i)dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(x^i). \quad (47)$$

Cet estimateur de Monte Carlo est un estimateur sans biais (loi des grands nombres). D'après le théorème de la limite centrale, il est ensuite possible de construire des intervalles de confiance qui vont encadrer l'erreur commise. Pour une telle méthode Monte Carlo, dite parfaite, la vitesse de convergence dépend essentiellement de N .

Echantillonnage d'importance

Dans la plupart des cas, il est malheureusement impossible d'échantillonner correctement à partir de la densité de probabilité $p(x)$. Ceci est particulièrement vrai pour le problème du filtrage bayésien où la densité de probabilité *a posteriori* à estimer au temps $n + 1$, $p(x_{0:n+1}|y_{0:n+1})$ suit rarement une loi connue et est généralement complexe. Pour pallier cette première difficulté, on propose généralement la méthode d'échantillonnage, qui introduit une fonction d'importance $q(x)$ à partir de laquelle il est possible d'échantillonner. En repartant du problème initial

$$E[x] = \int_N g(x)p(x)dx, \quad (48)$$

on introduit

$$q(x) \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x - x^i), \quad (49)$$

et l'on obtient

$$E[x] = \int_N g(x)p(x)dx = \int_N g(x) \frac{p(x)q(x)}{q(x)}dx \cong \int_N g(x) \frac{p(x)}{q(x)} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x - x^i)dx. \quad (50)$$

Puis en notant

$$w(x^i) = \frac{p(x^i)}{q(x^i)}, \quad (51)$$

on obtient

$$E[x] \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w(x^i)g(x^i), \quad (52)$$

où les termes $w(x^i)$ sont les poids d'importance. Pour le problème de filtrage initial et l'estimation de $p(x_{0:n+1}|y_{0:n+1})$, les poids d'importance $\{w_{n+1}^i, i = 1, \dots, N\}$ sont égaux à

$$w_{n+1}^i = w(x_{0:n+1}^i) = \frac{p(x_{0:n+1}^i|y_{0:n+1})}{q(x_{0:n+1}^i|y_{0:n+1})} = \frac{p(y_{0:n+1}|x_{0:n+1}^i)p(x_{0:n+1}^i)}{p(y_{0:n+1})q(x_{0:n+1}^i|y_{0:n+1})}. \quad (53)$$

Toutefois, dans le cadre du filtrage bayésien, la quantité $p(y_{0:n+1})$ n'est pas exprimable, c'est pourquoi les poids d'importance sont remplacés par une valeur proportionnelle

$$w_{n+1}^{i,*} = \frac{p(y_{0:n+1}|x_{0:n+1}^i)p(x_{0:n+1}^i)}{q(x_{0:n+1}^i|y_{0:n+1})}, \quad (54)$$

et les poids normalisés prennent ainsi la valeur

$$w_{n+1}^{\tilde{i},*} = \frac{w_{n+1}^{i,*}}{\sum_{j=1}^N w_{n+1}^{j,*}}. \quad (55)$$

On voit donc que les poids originaux w_{n+1}^i ont été remplacés par une estimation

$$w_{n+1}^{\hat{i}} = N w_{n+1}^{\tilde{i},*}. \quad (56)$$

La méthode d'échantillonnage d'importance que nous venons de présenter représente donc la base de la méthode de Monte Carlo séquentielle et de ses extensions pour le problème du filtrage bayésien.

Méthode de Monte Carlo Séquentielle avec échantillonnage d'importance.

La méthode de Monte Carlo séquentielle avec échantillonnage d'importance peut se formuler sous l'algorithme général suivant :

L'objectif est d'obtenir au temps $n+1$ une estimation de la distribution $p(x_{0:n+1}^i|y_{0:n+1})$ puis de propager séquentiellement cette estimation au cours du temps sans modifier de façon trop importante les précédentes estimations. Pour garantir de bonnes propriétés et retrouver les poids d'importance tels qu'exprimés précédemment, la fonction d'importance doit pouvoir se mettre sous la forme

$$q(x_{0:n+1}|y_{0:n+1}) = q(x_0|y_0) \prod_{k=1}^n q(x_k|x_{0:k-1}, y_{0:k}). \quad (63)$$

À la lumière de ces derniers éléments, il est manifeste que la difficulté intrinsèque à l'échantillonnage se reporte sur la fonction d'importance. Si cette dernière est mal choisie, les performances des estimations seront mauvaises et, inversement, plus la fonction d'importance sera proche de la densité de probabilité *a posteriori* à estimer, plus les estimations seront proches de la solution analytique. Le problème du choix de la fonction d'importance est lié à la variance des poids d'importance, qui augmente inconditionnellement au cours du temps pour des fonctions d'importance de la forme (63). De façon pratique, ceci implique un phénomène de dégénérescence de l'algorithme : après un certain nombre d'itérations, l'ensemble des poids se concentre sur un seul élément tandis que toutes les autres valeurs seront très proches de zéro. Pour obvier ou tout du moins limiter ce phénomène, la solution consiste à sélectionner la fonction d'importance minimisant la variance des poids, qui est nommée fonction d'importance optimale, *i.e.* pour un temps k

$$p(x_k|x_{k-1}^i, y_k). \quad (64)$$

Algorithme 4 : Méthode de Monte Carlo Séquentielle avec échantillonnage d'importance.

début

Initialisation

$$\forall i = 1, \dots, N, \text{ échantillonnage : } x_0^i \sim q(x_0|y_0). \quad (57)$$

Evaluation et normalisation des poids d'importance

$$\forall i = 1, \dots, N, : w_0^{i,*} = \frac{p(y_0|x_0^i)p(x_0^i)}{q(x_0^i|y_0)}, \quad (58)$$

$$\forall i = 1, \dots, N, : \tilde{w}_0^{i,*} = \frac{w_0^{i,*}}{\sum_{j=1}^N w_0^{j,*}}. \quad (59)$$

Pour les temps $k \geq 1$

$$\forall i = 1, \dots, N, \text{ échantillonnage : } x_k^i \sim q(x_k|x_{0:k-1}^i, y_{0:k}) \text{ et } x_{0:k}^i = (x_{0:k-1}^i, x_k^i). \quad (60)$$

$\forall i = 1, \dots, N$, évaluation puis normalisation des poids d'importance :

$$\forall i = 1, \dots, N, : w_k^{i,*} = w_{k-1}^{i,*} \frac{p(y_k|x_k^i)p(x_k^i|x_{k-1}^i)}{q(x_k^i|x_{0:k-1}^i, y_{0:k})}, \quad (61)$$

$$\forall i = 1, \dots, N, : \tilde{w}_k^{i,*} = \frac{w_k^{i,*}}{\sum_{j=1}^N w_k^{j,*}}. \quad (62)$$

fin

Pour cette fonction d'importance optimale, on obtient pour la mise à jour des poids d'un temps $k - 1$ à un temps k

$$w_k^i = w_{k-1}^i \frac{p(y_k|x_k^i)p(x_k^i|x_{k-1}^i)}{p(x_k^i|x_{k-1}^i, y_k)} = w_{k-1}^i p(y_k|x_k^i). \quad (65)$$

Mais une difficulté subsiste également pour cette fonction d'importance optimale car il s'avère difficile d'échantillonner à partir de $p(x_k|x_{k-1}^i, y_k)$, cette expression contenant une intégrale qui n'admet généralement pas d'expression analytique. Cette évaluation est possible dans le cas des modèles d'espace d'états partiellement gaussiens, cadre dans lequel nous travaillerons à la section 5.4 et que nous présenterons en détails. Toutefois, dans les autres cas, il faut faire appel à des méthodes d'approximation ou de rééchantillonnage qui sont exposées ici très brièvement.

Extensions de la méthode MCS : rééchantillonnage, Rao-Blackwellisation

Le choix de la fonction d'importance cristallise ainsi les difficultés de la méthode originale de Monte Carlo séquentielle. Certaines études proposent d'approcher la

fonction d'importance optimale par des approximations ou des linéarisations locales mais la grande majorité des recherches, partant de la dégénérescence inconditionnelle des poids, s'est focalisée sur la limitation de ce phénomène et le contrôle des poids. Ces méthodes sont fondées sur des techniques de rééchantillonnage qui consistent basiquement à multiplier les particules avec des poids importants et à éliminer celles de poids faible. La technique de rééchantillonnage d'importance (*Sequential Importance Sampling/Resampling Monte Carlo*) est la plus populaire. Elle adapte la méthode originale en ajoutant une étape de rééchantillonnage fondée sur des seuils à déterminer (ex : entropie des poids). Le développement de telles méthodes a donné lieu à de nombreux travaux de par les difficultés que le rééchantillonnage introduit : perte de propriétés de convergence des résultats à cause de dépendances statistiques, difficultés de parallélisation etc. D'autres propositions consistent à coupler des résolutions analytiques et théoriques pour réduire la variance. La méthode la plus connue, dite de *Rao-Blackwellisation*, consiste à traiter un vecteur d'état décomposé lui-même en deux sous-vecteurs. Dans le cas conditionnellement linéairement gaussien, par exemple, certains traitements peuvent ainsi être réalisés avec le filtre de Kalman.

5.3 Estimation bayésienne et trafic routier

L'estimation du vecteur d'état du trafic est une problématique de recherche actuelle importante en vue du développement d'outils d'aide à la décision pour la gestion active du trafic et des applications de contrôle. Le problème se résume classiquement à l'estimation en ligne d'un vecteur d'état x le long d'une section de route, toutes les anciennes mesures du système étant par ailleurs connues jusqu'à l'instant présent. Le vecteur x contient toutes les informations utiles à la description du système, qui sont généralement les variables macroscopiques globales sur la section : débits, densités et/ou vitesses. Le vecteur des observations y représente les mesures bruitées issues généralement de capteurs boucles, qui mesurent tout ou une partie du vecteur d'état (ex : débits, vitesses). Pour un certain nombre d'applications en traitement du signal, le filtre de Kalman est largement utilisé, fournissant une estimation en ligne du vecteur d'état d'un système dynamique linéaire. En revanche, le cas du trafic routier et la non linéarité du système a conduit les chercheurs à se tourner vers des alternatives et extensions du filtre de Kalman comme le filtre de Kalman étendu ou le filtre de Kalman inodore. Wang et consorts appliquent le filtre de Kalman étendu en combinaison avec un modèle de trafic stochastique pour estimer le vecteur d'état [143]. L'approche est validée avec des données réelles qui sont des données trafic recueillies sur huit heures sur un segment autoroutier de 4.1 km. Les auteurs soulignent l'importance des paramètres du modèle et ainsi du calibrage du modèle dans leurs estimations. Plus récemment, leur travail a été étendu à une estimation simultanée de ces paramètres [144], car le calibrage et même le choix du modèle revêtent une importance cruciale dans l'application du filtrage bayésien au trafic routier. Concernant le filtre de Kalman étendu, il a été montré que si la probabilité de transition de l'état et celle sur les observations n'étaient pas par hypothèse linéaires, la méthode requerrait tout de même des linéarisations locales,

pour l'estimée courante, que tous les modèles ne permettent pas. C'est pourquoi des travaux récents se sont tournés vers le filtre de Kalman inodore de Julier *et al.* [76] pour estimer précisément le système sans avoir recours aux étapes de linéarisation du filtre de Kalman étendu. Dans [62], Hegyi *et al.* comparent le filtre de Kalman inodore et étendu pour le trafic routier. Les auteurs n'arrivent pas à départager les deux méthodes sur la base des performances en estimation mais le filtre de Kalman inodore est préféré de par sa simplicité d'implémentation (pas de calculs de jacobien). Les méthodes de filtrage particulaire ont également fait leur apparition dans la littérature relative au trafic routier [23, 102, 103, 128]. Dans [103], les auteurs proposent de comparer le filtre de Kalman inodore avec le filtrage particulaire. Une méthode de Monte Carlo séquentielle avec rééchantillonnage est proposée et appliquée à un large réseau. Un modèle stochastique dérivé du modèle offre/demande cellulaire de Daganzo [33] est utilisé. À partir de données synthétiques et réelles du réseau de trafic routier belge, les auteurs notent tout d'abord de très bons résultats pour les deux méthodes. Néanmoins, pour les deux types de données, les performances du filtrage particulaire surpassent celles du filtrage de Kalman inodore. Le filtrage particulaire est capable de prédire efficacement le vecteur d'état en tout point du segment avec essentiellement le débit en amont et en aval de la section. Les auteurs concluent sur les applications prometteuses de cette méthode à de larges réseaux et un ensemble de mesures restreint. Cette idée est poursuivie dans un article ultérieur où les auteurs proposent des méthodes de parallélisation du filtrage particulaire pour des applications à de larges réseaux [63]. Le réseau routier est partitionné en sous-réseaux pour chacun desquels sont alloués des processeurs. Les vecteurs d'états et d'observations sont eux-mêmes partitionnés en sous-vecteurs, les variables de voisinage entre les sous-réseaux agissant en entrée du système pour chaque sous vecteur. Ce genre d'applications ouvre la voie à des problématiques nouvelles comme le placement optimal des capteurs sur un réseau ou la fusion de données.

5.4 Méthode de Monte Carlo Séquentielle pour le trafic routier avec intégration de la météorologie

Dans cette section, nous nous proposons de développer une méthode de filtrage particulaire pour l'estimation de l'état du trafic routier. Comme toute application du filtrage bayésien, la méthode nécessite tout d'abord un modèle qui décrit la dynamique du trafic. Ici, c'est le modèle LWR dans une version discrétisée offre/demande qui est utilisé [33]. Nous décrirons ensuite plus précisément le cadre d'application du filtrage particulaire, estimant à ce sujet que, selon des hypothèses raisonnables, il est possible de se placer dans un cas particulier permettant de trouver la fonction d'importance optimale. La méthode sera alors appliquée sur des données opérationnelles du périphérique lyonnais. Ces données agrégées, préalablement analysées à travers le prisme de l'impact météorologique sur le trafic, génèrent des résultats confirmant un impact certain de la pluie sur le diagramme fondamental. C'est ensuite l'intégration des effets météorologiques dans la méthode d'estimation qui sera illustrée. Un accent particulier sera mis sur la répercussion des effets météorologiques sur les erreurs

d'estimation, ce qui doit justifier l'importance de leur prise en compte dans le développement de futurs outils d'aide à la décision.

5.4.1 Modèle macroscopique du 1er ordre

Le modèle LWR peut être adapté très simplement dans une version discrétisée au niveau d'une section [31]. En ce qui concerne la discrétisation, la section peut se diviser en n cellules de longueur Δx_i . Il s'agit ensuite d'un point de vue numérique, de mettre à jour le contenu de chaque cellule à chaque pas de temps numérique Δt_N . Pour chaque cellule i , les variables sont la concentration k_i à l'intérieur de la cellule et le débit q_i , débit sortant de la cellule (figure 5.1). Les mouvements d'entrées/sorties pour une cellule i peuvent être pris en compte à travers une variable qs_i .

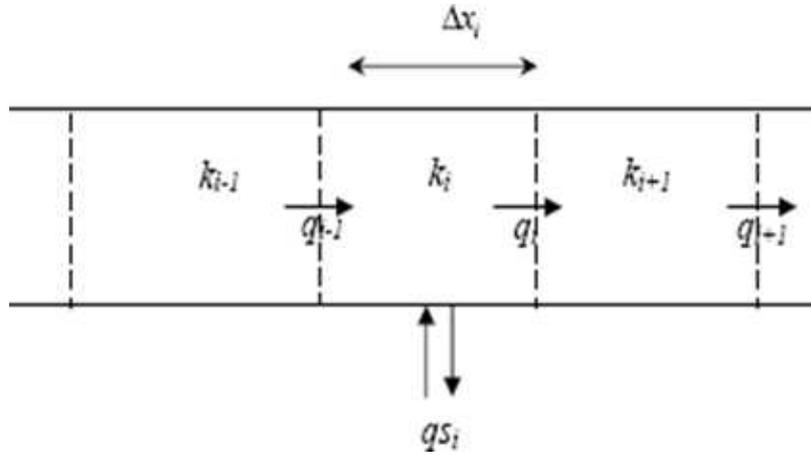


Figure 5.1 – Discrétisation de la section

À partir de cette discrétisation spatiale, nous appliquons un schéma numérique de Godunov, pour lequel on sait que la solution s'approche le plus de la solution entropique [93]. Le fonctionnement du schéma se fonde sur une version discrétisée de l'équation de conservation et une équation de bilan sur les débits, comme suit :

$$\text{Equation de conservation : } k_i(t + \Delta t_N) = k_i(t) + \frac{\Delta t_N}{\Delta x_i} (q_{i-1}(t) - q_i(t)). \quad (66)$$

$$\text{Bilan : } q_i(t) = \min(\Delta_i(t), \Omega_{i+1}(t)). \quad (67)$$

La première équation est ainsi une traduction directe de l'équation de conservation $\partial_t k + \partial_x q = 0$. Le schéma numérique est bien consistant car on retrouvera cette équation de conservation en faisant tendre Δt_N et Δx_i vers 0. La condition de stabilité CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) doit également être vérifiée ; elle peut se traduire ici par le fait que l'information ne doit pas atteindre la cellule suivante au cours d'un pas de temps. Ici, la condition CFL fait intervenir la vitesse maximum u_f telle que

$$u_f \leq \frac{\Delta x}{\Delta t_N}. \quad (68)$$

La seconde partie du schéma est une équation de bilan pour le débit d'une cellule i au temps t : le débit sortant sera simplement le minimum entre l'offre de la cellule

$i+1$ $\Omega_{i+1}(t)$ et la demande émanant de la cellule i $\Delta_i(t)$, c'est-à-dire un minimum en termes de débit entre le nombre de véhicules qui cherchent à s'écouler de la cellule i et le nombre de véhicules que peut accueillir la cellule suivante par rapport à sa capacité. Les fonctions d'offre et de demande vont dépendre des caractéristiques physiques propres aux cellules et vont prendre la forme suivante :

$$\Delta(k) = \begin{cases} q_{eq}(k) & \text{si } k \leq k_c, \\ q_{max} & \text{si } k > k_c. \end{cases} \quad \text{et} \quad \Omega(k) = \begin{cases} q_{max} & \text{si } k \leq k_c, \\ q_{eq}(k) & \text{si } k > k_c. \end{cases} \quad (69)$$

où K_c représente la densité critique séparant les régimes fluide et congestionné, $Q_{eq}(K)$ représente la relation fondamentale entre le débit q et la densité k et q_{max} définit la capacité ou débit maximum d'une cellule. La forme générale des deux fonctions est rappelée par la figure 5.2.

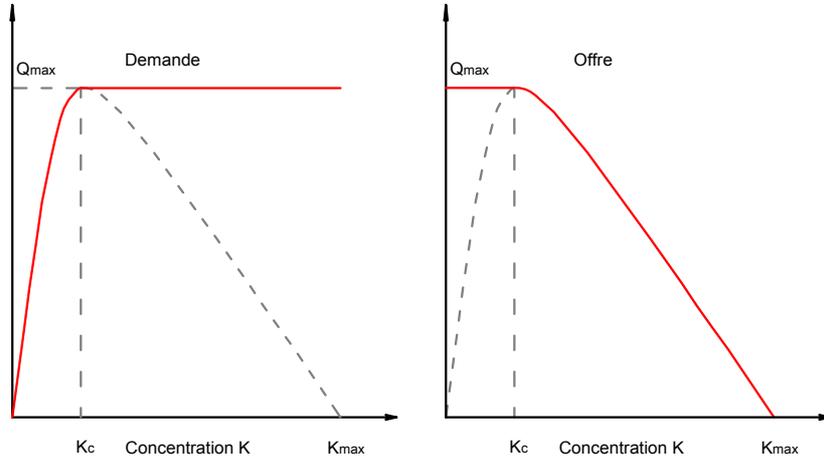


Figure 5.2 – Fonctions de demande et d'offre

Chaque cellule de la figure 5.1 donne d'ailleurs son propre diagramme fondamental, qui pourrait tout à fait varier dans le temps ou en fonctions d'évènements extérieurs (travaux, conditions météorologiques).

5.4.2 Méthode de Monte Carlo Séquentielle (MCS)

Le vecteur d'état du problème ainsi posé se compose pour un temps t quelconque de l'ensemble des débits et densités des n cellules de la section. En comptant le débit en amont q_0 , ce vecteur de taille $2n + 1$ s'écrit :

$$x_t = (k_1(t), \dots, k_n(t), q_0(t), \dots, q_n(t))^T. \quad (70)$$

Les entrées du système sont notées u_t et représentent la demande en amont et l'offre en aval de la section discrétisée. D'autres perturbations peuvent bien sûr être incorporées dans ce vecteur (incidents, zones de travaux, etc.). L'équation d'état consiste ainsi à estimer au temps $t + 1$ le vecteur d'état, soit

$$x_{t+1} = f(x_t, u_t). \quad (71)$$

En ajoutant des observations disponibles jusqu'au temps $t = t + 1$, c'est-à-dire des données issues de capteurs boucles, le problème peut s'inscrire dans un cadre de filtrage bayésien où l'estimation dynamique du vecteur d'état s'effectue à travers la construction d'une densité de probabilité *a posteriori*, qui représente la probabilité d'obtenir un certain vecteur d'état au temps $t + 1$ connaissant les observations y et les entrées u du système, soit $p(x_{0:t+1}|y_{0:t+1}, u_{0:t})$. Cette probabilité s'exprime sous la formulation récursive bayésienne suivante

$$p(x_{0:t+1}|y_{0:t+1}, u_{0:t}) = p(x_{0:t}|y_{0:t}, u_{0:t-1}) \times \frac{p(y_{t+1}|x_{t+1})p(x_{t+1}|x_t, u_{0:t})}{p(y_{0:t+1}|y_{0:t}, u_{0:t-1})}. \quad (72)$$

Le modèle de trafic exposé précédemment se traduit donc comme un processus markovien de distribution initiale $p(x_0)$ et de probabilité de transition $p(x_{t+1}|x_t, u_{0:t})$. Dans la section 5.2, nous avons montré que la méthode de filtrage particulière consistait à appliquer de façon séquentielle un échantillonnage d'importance pour estimer numériquement $p(x_{0:t+1}|y_{0:t+1}, u_{0:t})$. La difficulté majeure réside dans le choix de la fonction d'importance, qui peut, s'il n'est pas adéquat, mener à des estimations de piètre qualité. La fonction d'importance optimale est celle qui minimise la variance des poids et limite ainsi les phénomènes de dégénérescence inhérents à la méthode. Dans le cas du trafic routier, il apparaît raisonnable, sous certaines hypothèses, de se placer dans un cas où cette fonction d'importance est connue. L'approximation en question est celle d'un espace d'état partiellement gaussien où le système est écrit sous la forme

$$\begin{cases} x_t = f(x_{t-1}, u_{t-1}) + v_t, & v_t \sim N(0, Q_t), \\ y_t = Cx_t + w_t, & w_t \sim N(0, R_t). \end{cases} \quad (73)$$

où $f : \mathbb{R}^{n^*} \rightarrow \mathbb{R}^{n^*}$, C est une matrice de réels. Q_t et R_t dénotent respectivement les écarts types des bruits gaussiens v_t et w_t du vecteur d'état et du vecteur des observations. Les hypothèses, dans ce cas, sont donc des bruits gaussiens mais surtout une linéarité entre les observations et le vecteur d'état. Dans le cas d'une application au trafic routier, les quantités effectivement mesurées représentent la plupart du temps une partie du vecteur d'état (ici des débits) : il semble donc raisonnable de soutenir cette hypothèse, permettant l'obtention, après quelques développements, de formulations analytiques pour la fonction d'importance optimale. En effet, comme introduit dans [40], en notant

$$B^{-1} = Q_t^{-1} + C^T R_t^{-1} C, \quad (74)$$

$$m_t = B (Q_t^{-1} f(x_{t-1}) + C^T R_t^{-1} y_t), \quad (75)$$

il est possible d'obtenir pour la fonction d'importance optimale

$$x_t|x_{t-1}, y_t \sim N(m_t, B) \quad (76)$$

et ainsi de mettre les poids à jour à un temps t grâce à la formule

$$w_t^i = w_{t-1}^i \times p(y_t|x_{t-1}^i) \quad (77)$$

où

$$p(y_t|x_{t-1}) \propto \exp\left(-\frac{1}{2}(y_t - Cf(x_{t-1}))^T (Q_t + CR_t C^T)^{-1} (y_t - Cf(x_{t-1}))\right). \quad (78)$$

5.4.3 Présentation des données du périphérique lyonnais

Nous avons appliqué la méthode MCS à partir de données opérationnelles de la partie Est du périphérique lyonnais. Le gestionnaire de trafic CORALY a fourni des données trafic agrégées par pas de temps de six minutes. Plus précisément, les données proviennent de huit capteurs situés entre les points kilométriques 4.5 et 10.1 de la RD383 dans la direction Nord-Sud (figure 5.3).

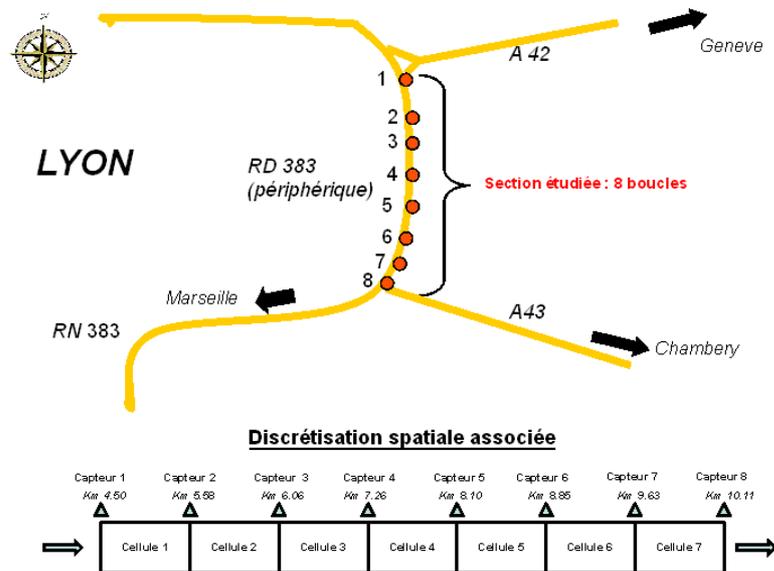


Figure 5.3 – Discretisation de la section

Pour mettre en place les scénarios, une demande typique en amont ainsi qu'une offre type en aval ont été générées, de même que les mouvements moyens d'entrées/sorties sur la section. Les données ont été préparées à partir de moyennes lissées des débits sur la section, pour les mardi et jeudi de mars 2007. Ces deux jours ouvrés de la semaine présentent des profils similaires en termes de volume et se prêtent bien à une fusion, comme le confirme la figure 5.4.

La section du périphérique considérée est fréquemment congestionnée : le flot en amont vient à la fois du Nord-Ouest de la ville et de l'autoroute en provenance de Genève (mouvements pendulaires). Ainsi, l'on retrouve classiquement de fortes valeurs du débit aux heures de pointes du matin et de la fin d'après-midi. À partir de la configuration des capteurs sur la section, la discrétisation du modèle a été effectuée de telle sorte que les différentes cellules soient séparées par les différents capteurs réellement situés sur le tronçon. La section se compose donc de sept cellules et huit capteurs. De plus, trois voies d'entrée ou de sortie sont localisées au niveau des cellules 3, 4 et 6. Des termes sources ont par conséquent été considérés pour ces trois cellules (termes qs_i de la figure 5.1).

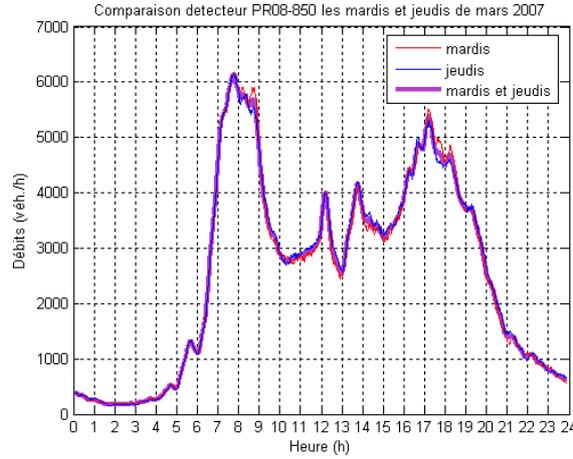


Figure 5.4 – Profils de débits quotidiens moyens pour les mardi et jeudi de mars 2007

5.4.4 Paramètres du modèle et procédure de détection des erreurs d'estimation

Choix des paramètres

Une première hypothèse pour les scénarios à venir tient au fait que les capteurs sont considérés fiables pour l'ensemble des cas-tests. Même si l'on peut appliquer le filtrage particulière dans une optique de détection de dysfonctionnements de capteurs (voir [128] par exemple), ce cas ne sera pas pris en compte ici et les capteurs sont considérés non défaillants. La forme du diagramme fondamentale utilisée au sein du modèle LWR est triangulaire avec les paramètres suivants :

- Densité critique $k_c = 0.1 \text{ veh}/m$,
- Densité maximale $k_{max} = 0.35 \text{ veh}/m$,
- Débit maximum $q_{max} = 167 \text{ veh}/min$.

À l'intérieur de la méthode de filtrage particulière, les matrices de covariances Q et R de l'état et des observations traduisent l'incertitude sur le modèle et les mesures. Pour les observations, l'incertitude sur les débits mesurés a été fixée à partir de l'écart-type

$$\sigma_R = 4.2 \text{ veh}/min, \quad (79)$$

où cette valeur est déduite d'une analyse des données réelles. La matrice de covariance des observations se définit ainsi comme

$$R_t = \text{diag}(\sigma_R^2). \quad (80)$$

Au regard du modèle, une confiance plus grande sera accordée par rapport aux données fournies par les capteurs boucles. Ainsi, pour la partie du vecteur d'état correspondant aux débits, on définit

$$\sigma_Q = \frac{1}{10} \sigma_R = 0.42 \text{ veh}/min. \quad (81)$$

Par hypothèse, les dispersions sur les mesures de densité sont plus petites que celles sur des débits. ainsi les n premiers éléments de la diagonale de la matrice Q_t sont choisis à partir de

$$\sigma_k = \sigma_q \times \frac{k_c}{q_{max}} = 0.25 \times 10^{-3} \text{veh}/m \quad (82)$$

Pour conclure, la diagonale de la matrice Q_t est donc composée de $2n + 1$ termes. Les n premiers sont égaux à σ_k^2 et représentent les variances sur les concentrations tandis que les $n + 1$ derniers termes de la diagonale sont égaux à σ_q^2 .

Tests de Wald séquentiels pour la détection des erreurs d'estimation

Afin de détecter efficacement les erreurs d'estimation, on peut s'aider d'une procédure d'alarme fondée sur des tests séquentiels de Wald [141]. Un test de Wald est une procédure statistique généralement employée pour détecter si un effet significatif quelconque existe. Ici, l'objectif est d'évaluer le degré de significativité entre les estimations et les mesures réelles et de donner l'alarme en cas de dérive suffisamment importante. Contrairement à des tests statistiques classiques, l'aspect séquentiel du test de Wald permet un couplage pertinent avec le filtrage particulière : la taille de l'échantillon n'est pas déterminée *a priori* mais évaluée au fur et à mesure que les données sont collectées. La décision du test se caractérise par une région d'indifférence qui peut être ajustée selon le niveau de prudence souhaité. Comme dans une procédure de test statistique classique, un test séquentiel de Wald part d'une paire d'hypothèses H_0 et H_1 , représentant respectivement l'hypothèse nulle et l'hypothèse alternative. Le but consiste à détecter une dérive $\pm D$ qui symbolisera ici l'erreur entre les estimations et les mesures. Pour l'application aux données du périphérique lyonnais, cette dérive a été fixée à 2 veh/min. Le paramètre de dérive, noté p , constitue la variable à estimer pour chacun des deux tests T_1 et T_2 , appliqués à chaque capteur :

$$\text{Test } T_1 : \begin{cases} H_0 : p = 0 \\ H_1 : p \geq D \end{cases} \quad \text{et Test } T_2 : \begin{cases} H_0 : p = 0 \\ H_1 : p \leq -D \end{cases} \quad (83)$$

Un test de Wald repose ensuite sur le principe du calcul de la somme du ratio de la vraisemblance Λ_t au fur et à mesure de l'obtention de nouvelles données :

$$Z_t = Z_{t-1} + \log(\Lambda_t). \quad (84)$$

La règle de décision se fonde ensuite sur deux seuils a et b tels que $a < b$, qui se définissent par rapport à l'erreur α de type 1 (faux positifs) et à l'erreur β de type 2 (faux négatifs) :

$$a = \log \frac{\beta}{1 - \alpha} \quad \text{et} \quad b = \log \frac{1 - \beta}{\alpha}. \quad (85)$$

Dans notre application, les fausses alarmes sont minimisées en fixant α à 0.01 et β à 0.05.

À partir de ces seuils, une règle d'alarme est fixée de la façon suivante :

$$\begin{cases} \text{Rejet de } H_1 \text{ si } Z_t \leq a \\ \text{Acceptation de } H_1 \text{ si } Z_t \geq b \\ \text{Indifférence si } a < Z_t < b \end{cases} \quad (86)$$

Ces tests de Wald séquentiels ont été appliqués pour chaque capteur. Leur robustesse et leur sensibilité permettent de prédire efficacement des erreurs d'estimation significatives, qui sont dues pour notre application précise à l'occurrence d'un événement météorologique sur le réseau. Dans une perspective d'application temps-réel, le test de Wald apporterait ainsi une aide à la décision pour la détection d'anomalies ou d'évènements extérieurs, permettant au gestionnaire d'agir en fonction des moyens à sa disposition.

5.4.5 Résultats avec intégration des effets de la pluie

Les résultats présentés dans cette fin de chapitre visent à justifier l'intégration des effets météorologiques dans les outils d'aide à la décision pour la gestion du trafic. L'impact de la pluie sur la section sera brièvement évoqué, à partir d'une étude empirique effectuée dans le cadre méthodologique déployé au chapitre 2. Ensuite, l'influence de la pluie sur les résultats des estimations du vecteur d'état par la méthode Monte Carlo séquentielle sera mise en évidence à travers deux scénarios de simulation d'évènements pluvieux sur la section.

Mise en évidence de l'impact de la pluie sur la section

En respectant la méthodologie exposée au chapitre 2, nous examinerons tout d'abord quelques résultats empiriques, de sorte à mieux caractériser l'impact de la pluie sur la section. Les données météorologiques proviennent de la station météorologique de l'aéroport de Lyon-Bron, située à moins de trois kilomètres de la section étudiée, et rendent principalement compte des taux horaires de précipitation (mm/h). Ces données, trafic et météorologiques, ont été collectées sur deux semaines consécutives et deux échantillons de données ont ainsi pu être comparés. Le premier contient 1547 observations (données agrégées sur 6min) enregistrées lors de conditions pluvieuses (pluie fine-moyenne <3mm/h). Ces observations ont été sélectionnées aux heures de pointe, entre 6 et 9h pour le premier jour et 17 et 21h pour le deuxième. Ces heures de la journée correspondent aux pics de débits sur 24 heures. Il est précisé qu'il a plu au moins 0.1 cm/h pendant les périodes considérées. Pour cette étude, un manque de données en conditions pluvieuses a empêché de considérer plusieurs classes de précipitation et les résultats se limiteront ainsi à une séparation binaire temps sec/pluie. Afin de garantir la rigueur de la comparaison, le deuxième jeu de données, correspondant à la modalité "temps sec", a été construit à partir d'observations des mêmes périodes aux mêmes jours, mais une semaine plus tôt : il s'agit ainsi d'un jeu de données de 1583 observations (volume quasi similaire) sans aucune occurrence de précipitation constatée pendant les périodes de recueil. De par l'hétérogénéité (inévitabile) de la section (entrées/sorties, virages,

limitation vitesse), quatre capteurs sur les sept ont été sélectionnés avec les mêmes caractéristiques : vitesse limitée à 90 km/h, 3 voies de circulation, lignes droites.

Les résultats montrent un effet manifeste de la pluie sur le diagramme fondamental, comme le montre la figure 5.5.

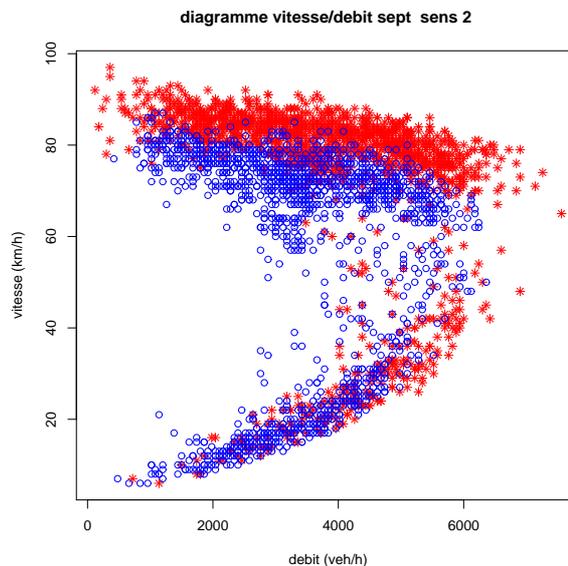


Figure 5.5 – Diagramme vitesse/débit de quatre capteurs dans le sens Nord-Sud. Données CORALY

La pluie affecte de façon significative les deux grands paramètres du flot de véhicules que sont la vitesse libre et la capacité. Pour la capacité, une chute de 15-16 % est observée tandis que la vitesse libre baisse de 9-10 % lors de conditions pluvieuses. Ainsi, ces deux variables, qui sont partie prenante du calibrage d'un modèle de trafic de type LWR, peuvent avoir leur importance lors de la production en ligne de résultats d'outils d'estimation du vecteur d'état. C'est ce que les deux prochains scénarios tentent d'illustrer.

Scenario 1 : événement pluvieux sur l'ensemble de la section entre 6 et 10h

Pour le premier scénario, les conditions de pluie fine observées précédemment ont été simulées sur toute la section entre 6h et 10h du matin. En d'autres termes, toutes les cellules de la section discrétisée ont été concernées par un événement pluvieux entre 6h et 10h (figure 5.6).

Le but de ce premier scénario est de montrer la répercussion de ces mauvaises conditions météorologiques sur les erreurs d'estimation, si la méthode de Monte Carlo séquentielle est appliquée avec un diagramme fondamental nominal, c'est-à-dire utilisant les paramètres standards exposés précédemment. Sur la figure 5.7, les résultats des estimations de débit pour la journée entière de test sont reportés. La figure superpose les estimations des débits et les mesures réelles pour l'ensemble de la journée. Si un diagramme fondamental nominal (temps sec) est conservé pendant

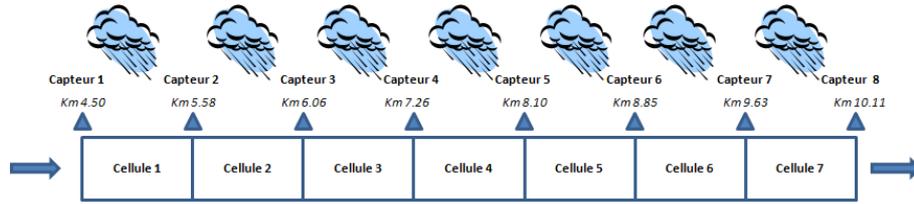


Figure 5.6 – Scénario 1 : conditions pluvieuses sur toute la section entre 6 et 10h

ces 24 heures consécutives, des erreurs d'estimation apparaissent clairement pendant la période pluvieuse.

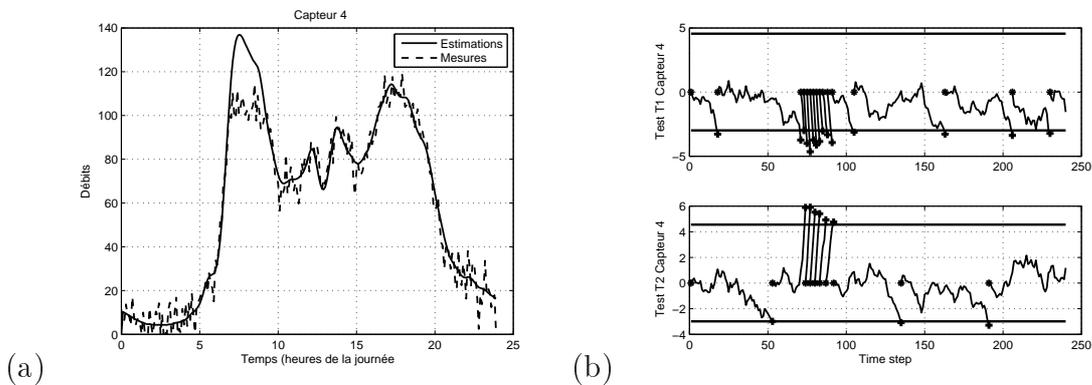


Figure 5.7 – Scénario 1 : erreurs d'estimation sur le capteur 4 entre 6 et 10h. (a) comparaison estimations/mesures et (b) test de Wald associés

La figure 5.7 montre également les résultats des tests de Wald, qui confirment les observations graphiques. Avant le pas de temps 60, c'est-à-dire avant 6h du matin, quand les conditions météorologiques sont normales, on peut observer que l'hypothèse H_0 est toujours acceptée pour le test T_1 , idem pour le test T_2 . En regardant le test T_2 , il apparaît qu'entre le pas de temps 60 et le pas de temps 100, c'est-à-dire pendant l'occurrence de l'évènement pluvieux, les conditions dégradées mènent à un franchissement de la frontière supérieure, indiquant que l'hypothèse alternative H_1 devrait être acceptée et les tests arrêtés. La dérive est donc estimée à $d \leq -2veh/min$. Ces résultats montrent que les tests de Wald peuvent représenter un bon complément pour la détection de dérives dans les estimations. Dans ce cas, ils permettraient de détecter en temps réel des conditions météorologiques particulières. En imaginant que l'utilisateur de l'outil, le gestionnaire, ait un accès en parallèle à une source d'information météorologique en temps réel, il serait possible de basculer sur un diagramme fondamental approprié, adapté à l'intensité des précipitations observée. En relançant la même expérience mais en changeant de diagramme fondamental entre 6 et 10h du matin (diagramme fondamental pluie fine), on observe que les estimations redeviennent correctes pour l'ensemble de la journée (figure 5.8).

Ce premier scénario montre de façon générale les bonnes performances de la méthode de filtrage particulière lorsque le modèle est bien calibré. Sur la figure 5.8, les estimations sont fidèles aux mesures et la méthode permet une reconstruction de

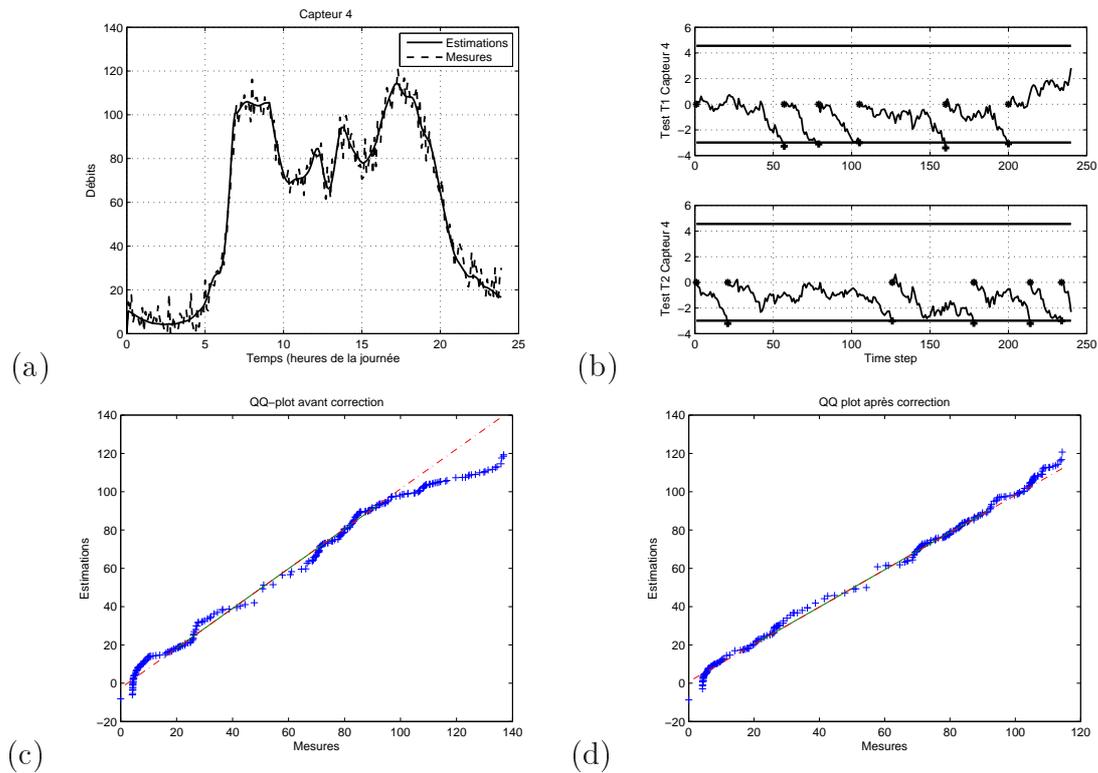


Figure 5.8 – Scénario 1 : Estimations après adaptation à la pluie (a) comparaison estimations/mesures, (b) test de wald associés, (c) QQ-plots avant correction (d) QQ-plots après correction

l'état au fur et à mesure de l'arrivée de nouvelles observations. Toutefois, ce premier scénario a bien confirmé qu'en ne tenant pas compte des effets météorologiques sur le trafic, il peut arriver que le calibrage d'un modèle unique mène à des résultats erronés dans un contexte météorologique perturbé. Les premiers résultats ont montré alors qu'il était possible de pallier cette difficulté en basculant sur un autre diagramme fondamental lorsque cela est possible. Mais des cas plus complexes peuvent se présenter. En particulier, le prochain scénario va consister en la simulation d'un évènement pluvieux non seulement localisé dans le temps mais aussi dans l'espace, ce qui pose des difficultés supplémentaires.

Scénario 2 : évènement pluvieux spatialement réduit entre 16 et 20h

Même si la précision spatiale est ici portée à son paroxysme pour les besoins d'une simulation, il est très courant en France, notamment pendant l'été, d'observer des averses orageuses très localisées, intermittentes, qui présentent de plus la particularité d'être très intenses, pouvant propager très vite une perturbation du niveau de service sur une partie du réseau. Dans le second scénario, un tel cas a été simulé à travers l'introduction des effets de la pluie sur les mesures fournies par le capteur 6 essentiellement (figure 5.9).

Considérant un type d'évènement orageux local, donc à plus forte intensité, les

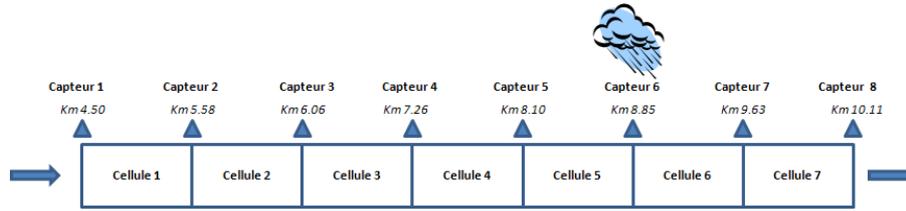


Figure 5.9 – Scénario 2 : conditions pluvieuses pour le capteur 6 seulement entre 16 et 20h

réductions de paramètres simulées ont été dans notre cas un peu plus élevées (baisse de la capacité de 20% par exemple). La perturbation a été placée entre 16 et 20h, et comme pour le premier scénario, les résultats des estimations montrent une dérive pendant la période pluvieuse. Cependant, même si l'évènement n'est censé concerner qu'une seule cellule, tous les capteurs affichent des erreurs d'estimation pendant la période pluvieuse : l'erreur se propage sur la section entière et il est impossible de déterminer l'endroit précis de l'évènement. La figure 5.10 fait ainsi apparaître des erreurs d'estimation aussi bien pour le capteur 6 que pour le capteur 2.

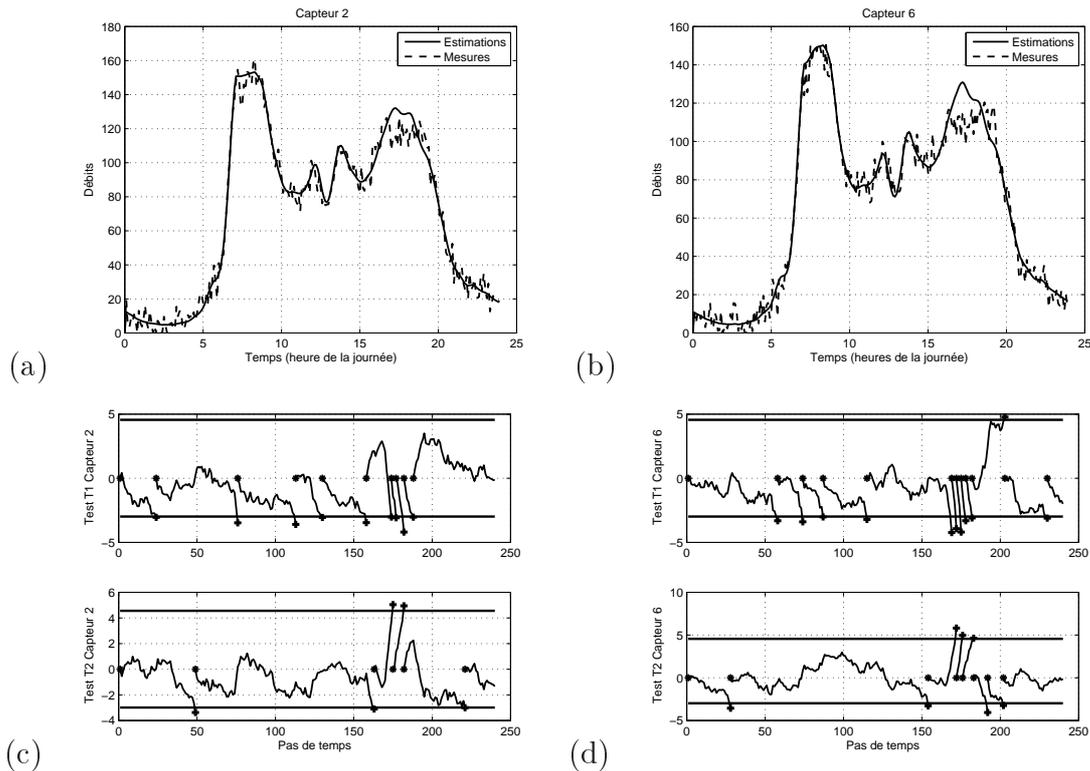


Figure 5.10 – Scénario 2 : Erreurs d'estimation pour un évènement local. (a) pour le capteur 2, (b) pour le capteur 6, (c) et (d) Tests de Wald associés aux capteurs 2 (c) et 6 (d)

Les tests séquentiels de Wald ne permettent pas non plus de détecter précisément le caractère local de l'évènement pluvieux. Devant cette difficulté, il semble nécessaire de mettre en place une procédure de détection en espace de l'évènement

météorologique. Une telle procédure est proposée ici, dont le principe est de tester itérativement chaque cellule en la corrigeant par un diagramme fondamental approprié. À la fin de chaque itération, une procédure de test statistique est mise en place afin de comparer *a posteriori* les distributions finales des mesures et des ré-estimations pour tous les capteurs. À la fin de la procédure, les *p-values* globales et les valeurs des statistiques de test sont comparées pour déterminer pour quel capteur la correction des paramètres a mené aux meilleurs résultats. Avant de décrire la procédure plus en avant, il faut justifier le choix du test statistique. Dans la famille des tests paramétriques, le test de Kolmogorov Smirnov est généralement utilisé pour vérifier si deux échantillons viennent de la même distribution. Une faiblesse de ce test réside toutefois dans le fait que c'est la différence maximum entre les fonctions de répartition empiriques qui est prise en compte. Ce défaut est corrigé par le test de Cramer Von Mises [4], qui s'appuie sur une norme L_2 des différences qui prend mieux en compte l'ensemble des distributions. Un test de Cramer Von Mises a exactement la même application qu'un test de Kolmogorov. Dans le cas d'un test entre deux échantillons, il est toutefois plus puissant que le test de Kolmogorov [4]. La statistique du test pour deux distributions F_1 et F_2 est

$$T = \int [F_1(x) - F_2(x)]^2 dx, \quad (87)$$

le test se fondant ensuite classiquement sur deux hypothèses H_0 et H_1 telles que

$$\begin{cases} \text{hypothèse nulle } H_0 : F_1(x) = F_2(x) \forall x, \\ \text{hypothèse alternative } H_1 : F_1(x) \neq F_2(x). \end{cases} \quad (88)$$

Les tests de Cramer Von Mises ont été effectués à un niveau de significativité de $\alpha = 0.05$ avec le calcul des *p-values* associées et des statistiques du test. A partir de ces tests, le pseudo-code de la procédure de détection en espace peut être résumé (algorithme 5).

Nous avons intégré cette procédure au scénario 2 et en présentons les résultats à l'aide de la figure 5.11. On remarque que la correction du capteur 6, capteur concerné par l'évènement pluvieux, maximise la probabilité que les estimations et les mesures produites viennent de la même distribution. Cette procédure permet de détecter le phénomène météorologique en espace et de corriger au bon endroit les paramètres de calibrage du modèle LWR utilisé. Si les estimations sont relancées avec une correction pour la cellule 6, elles redeviennent correctes pour l'ensemble des capteurs (partie basse de la figure 5.11).

Algorithme 5 : Procédure de détection en espace de la zone pluvieuse.

début

Etape 1 : test itératif**pour** i allant de 1 au nombre de cellules **faire**

1. Correction : basculer vers un diagramme fondamental "pluie" pour la cellule i ,
2. Estimation : lancer la procédure complète d'estimation avec les paramètres ainsi ajustés,
3. Evaluation : Comparaison des distributions des estimations et des mesures à l'aide de tests de Cramer Von Mises.

fin**Etape 2 : détection**

Comparer les statistiques du test et les p-values. La bonne cellule est celle qui maximise la p-value moyenne et minimise la statistique du test.

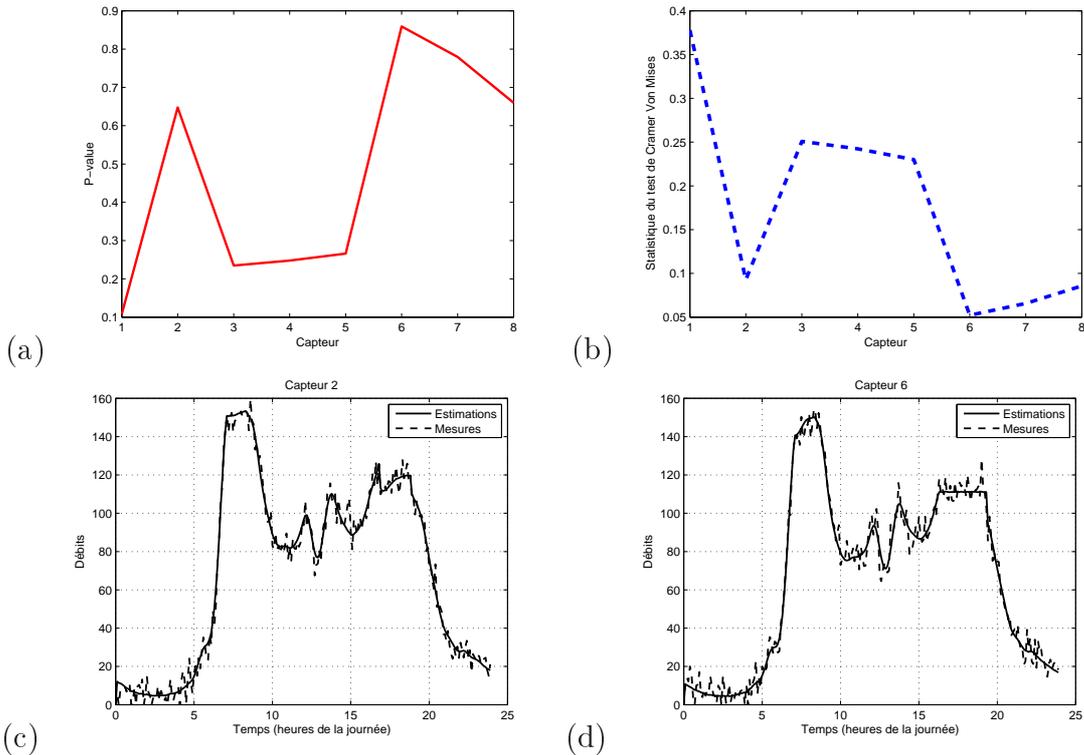
fin

Figure 5.11 – Scénario 2 : correction des paramètres du diagramme fondamental au bon endroit grâce à la procédure de détection. (a) P-values des tests de Cramer Von Mises successifs (b) Statistiques des tests successifs de Cramer Von Mises (c) et (d) Estimations corrigées pour les capteurs 6 et 2

5.5 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre s'orientent vers de futures applications et vers le développement d'outils d'aide à la décision pour la gestion du trafic qui prennent mieux en compte les effets météorologiques. La question de l'estimation en ligne du vecteur d'état a été traitée dans un cadre de filtrage bayésien. Après une revue des principales méthodes, il semble que le filtrage particulaire, ou méthode de Monte Carlo séquentielle, se présente comme une alternative efficace, à la mise en oeuvre facile, et particulièrement adaptée aux modèles non linéarisables. Une telle méthode d'estimation repose sur un modèle de trafic dont les paramètres sont directement affectés par les conditions météorologiques. Les simulations construites à partir de données opérationnelles constituent une preuve de concept pour l'intégration des effets météorologiques dans les outils d'estimation. Nous avons montré que, là où le Monte Carlo Séquentiel peut être très efficace en ligne dans une optique de reconstruction de l'état à partir de nouvelles observations, la présence de conditions météorologiques pluvieuses pouvaient fortement dégrader les performances en touchant les paramètres du modèle de trafic utilisé, comme la capacité ou la vitesse. Si le gestionnaire dispose d'un modèle paramétré par la pluie, il pourrait être capable de basculer en temps réel sur le bon modèle (du point de vue météorologique) et ainsi corriger les estimations. Un scénario plus complexe a été aussi présenté, avec une pluie très finement localisée, qui a mené à la proposition d'une procédure de détection en espace. Un tel scénario peut avoir son intérêt dans le sens où l'information météorologique n'a pas toujours la granularité idéale. Parmi les perspectives de ce travail, la poursuite de la validation de la méthode doit être envisagée, avec d'autres données recueillies lors de conditions pluvieuses. Au niveau du Monte Carlo Séquentiel, la parallélisation de la méthode, introduite dans [63], est une piste de recherche séduisante, tout comme la comparaison rigoureuse avec d'autres extensions du filtre de Kalman : filtre de Kalman étendu, le filtre de Kalman inodore ou les ensembles de filtre de Kalman. Pour ces dernières méthodes, l'utilisation d'un modèle du deuxième ordre tel que présenté au chapitre 3 pourrait s'avérer pertinente.

Conclusion

Synthèse des travaux

La considération d'un événement météorologique tout au long de ce manuscrit ne doit pas pour autant amener à le conclure... dans la précipitation! Aussi, les grandes lignes de notre travail et les perspectives de recherche qui en découlent seront non seulement résumées, mais encore examinées dans ce chapitre conclusif. Nos recherches se sont portées sur une source d'incertitude bien circonscrite mais non moins importante de la modélisation du trafic : les conditions météorologiques. Une présentation classique de l'état de l'art du sujet dans le chapitre 1 a confirmé les besoins réels de recherche sur ce thème, besoins qui peuvent se justifier par plusieurs raisons. D'un point de vue méthodologique tout d'abord, car l'analyse des travaux existants met en lumière une trop grande hétérogénéité des études empiriques, voire une dispersion, au niveau des types de données (trafic ou météorologiques) et des autres conditions. La méthodologie présentée dans le chapitre 2 a tenté précisément de corriger ces travers, en préconisant une phase de sélection des données systématisée. Cette méthodologie passe ainsi par la neutralisation d'un ensemble de facteurs exogènes pouvant biaiser les résultats, et que la synthèse des publications existantes a bien mise en évidence : baisse de la demande lors de conditions météorologiques dégradées, composition du trafic, type de section, géodésie, précision des données météorologiques, etc. D'autre part, il est apparu que les travaux existants, souvent limités par la nature des données mises à disposition, n'ont jamais pris en compte les possibilités multi-niveaux offertes par des données boucles individuelles. A l'inverse, la méthodologie d'analyse que nous avons proposée repose essentiellement sur ce type de données, qui permet par agrégations et changements d'échelles successifs de passer du niveau du comportement individuel des conducteurs (microscopique), à celui global du flot de véhicules dans son ensemble (macroscopique), en passant par les sous-groupes qui le composent (mésoscopique).

Cette approche a été appliquée dans le chapitre 2 à plusieurs échantillons de données. Après des études préliminaires effectuées sur des échantillons de taille limitée, qui ont permis aussi bien de dégager des premières tendances que de confirmer certains facteurs à risque pointés dès l'analyse bibliographique, nos résultats se sont fondés sur l'analyse de données suisses et françaises généreusement mis à notre disposition par l'Office Fédéral des ROutes (OFROU, Suisse) et le Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien (LROP, France). En raison de la disponibilité des données trafic et météorologiques, nous avons dû revoir à la baisse nos ambitions d'exhaustivité, sur plusieurs aspects : jamais plus de quatre catégories de conditions

météorologiques n'ont pu être prises en compte et des sections inter-urbaines de type 2×2 voies ont été essentiellement considérées. Malgré tout, la taille des échantillons analysés a permis de présenter en toute pertinence un certain nombre de résultats à chaque différent niveau d'analyse :

- Au niveau microscopique, la pluie entraîne une baisse significative des temps et des distances inter-véhiculaires courts, quelle que soit la voie de circulation considérée. La distribution des temps inter-véhiculaires s'accorde bien à une modélisation de type log-normale ou la fonction de densité peut être paramétrée selon l'intensité des précipitations. Cette baisse des TIV courts se reporte clairement sur les TIV plus sécurisants pour le conducteur. Le même phénomène de report s'observe pour les vitesses supérieures à 110 km/h, dont la proportion diminue par temps de pluie.
- Au niveau mésoscopique, si l'effet de la pluie sur la vitesse moyenne des groupes de véhicules est certain, c'est la définition même des pelotons qui doit être revue à travers le prisme d'une intégration du phénomène météorologique. La définition habituelle fondée sur un TIV critique uniforme ne prend en effet pas en compte la possible variation de cette valeur par temps de pluie. Une méthode simple pour un régime dense a été proposée au cours de nos travaux, qui fait ressortir des TIV critiques différents selon l'intensité de la pluie. Une légère tendance à la formation de peloton par temps de pluie se dégage ensuite mais ces recherches méritent d'être approfondies afin d'aboutir à une conclusion plus tranchée.
- Au niveau macroscopique, les résultats confirment un impact certain de la pluie sur le diagramme fondamental à travers des baisses significatives des valeurs des principales variables caractéristiques du flot : vitesse libre, capacité.

Grâce à ces études empiriques, les effets météorologiques sur le trafic sont mieux caractérisés, analysés et quantifiés. Ce chapitre d'analyse de données a été une première étape vers l'objectif suivant qui a consisté à prendre en compte notre phénomène dans la modélisation du trafic. Comme les préliminaires du chapitre 3 ont tenté de le souligner, la théorie du trafic représente un domaine d'une richesse insoupçonnée et la simple liste de l'ensemble des modèles de la littérature pourrait certainement noircir une centaine de pages. La modélisation du trafic convoque des disciplines variées qui vont de l'automatique (automates cellulaires, réseaux de Pétri) à la mécanique des fluides en passant par la chimie ou la physique statistique. Les modèles de trafic ont été présentés en trois grandes familles que sont les modèles microscopiques, les modèles cinétiques ou mésoscopiques et les modèles macroscopiques. Evidemment, des choix ont dû s'opérer de par la grande variété de ces différents domaines. Notre approche s'est ainsi focalisée sur une formulation cinétique qui présente l'intérêt de servir de passerelle entre les différents niveaux de modélisation. En effet, à partir d'une équation générale cinétique de type Vlasov, il est possible de dériver aussi bien des modèles microscopiques que des modèles macroscopiques. Les modèles microscopiques de type "lois de poursuite" n'ont pas été considérés ici mais la dérivation d'un modèle macroscopique original à deux équations, à partir de la formulation cinétique Vlasov, a été décrite en détails. Au

gré de quelques fermetures originales, le modèle macroscopique résultant présente des propriétés de stabilité linéaire intéressantes, qui dépendent de la forme du terme de relaxation choisie. De plus, les propriétés hyperboliques du modèle et la structure du problème aux valeurs propres peuvent pallier, à l'instar des modèles récents du second ordre, les défauts majeurs des anciens modèles à deux équations : solutions non physiques, anisotropie, etc. Mais la garantie de toutes ces bonnes propriétés ne doit pas empêcher d'utiliser un modèle du premier ordre lorsque cela est pertinent, c'est-à-dire dans beaucoup d'applications réelles. C'est pourquoi l'intégration de la météorologie dans les modèles de trafic a d'abord été illustrée pour le cas du modèle LWR. D'ailleurs, le modèle à deux équations présenté se ramène à un modèle de type LWR, si on en néglige la partie non homogène de retour vers l'équilibre. Au sein du modèle LWR, le paramètre météorologique s'intègre naturellement dans le diagramme fondamental qui dépend ainsi du niveau μ des précipitations. La pertinence des modèles du second ordre par rapport au modèle LWR peut ensuite se justifier à partir de la richesse qu'ils offrent dans le cas précis de l'intégration des effets météorologiques : si, comme pour un modèle du premier ordre, le niveau μ des précipitations fait maintenant partie intégrante du diagramme fondamental, les temps de relaxation vers l'équilibre peuvent eux aussi dépendre de la météorologie et amener une capacité de modélisation inédite des effets météorologiques. Afin d'intégrer au mieux l'ensemble des résultats extraits au chapitre 2, une équation additionnelle de type transport-réaction a été ajoutée pour modéliser au cours du temps l'évolution de la distribution des temps inter-véhiculaires, formant ainsi avec le modèle macroscopique original un système hybride méso-macroscopique. Là encore, les résultats empiriques permettent d'utiliser une distribution d'équilibre météorologique.

Dans le but d'illustrer aussi bien le comportement des modèles proposés que l'intégration de la météorologie en général, nous avons détaillé (cf. chapitre 4.2) plusieurs expériences numériques. Tout d'abord, un effort important s'est porté sur la discrétisation du nouveau modèle macroscopique à deux équations. Une méthode à pas fractionnaire (*splitting* de Strang) nous a semblé apte à traiter de façon efficace le système complet. Elle se compose d'une procédure en trois étapes permettant de traiter successivement la partie convective du système et le terme source tout en restant précis à l'ordre 2 en temps. Pour la partie convective, un schéma numérique de type Lagrange-projection a été envisagé. Il se fonde sur une formulation lagrangienne intégrale du système. Dans un premier temps, l'étape Lagrange convecte les cellules sur un pas de temps Δt . Ensuite, les solutions sont reprojctées sur le maillage eulérien initial à travers un bilan de masse et de quantité de mouvement. Ce schéma Eulérien tire ainsi tous les avantages de la formulation naturelle Lagrangienne et de sa précision tout en permettant par la projection de garantir l'approche par observateur requise par l'application recherchée. Il s'agit d'observer en un point les effets de la météorologie sur la dynamique du modèle et, ainsi, de rester dans un cadre eulérien au lieu de suivre des véhicules dans le temps. Ce schéma se justifie également par sa simplicité. En effet, contrairement à des approches Eulériennes classiques qui impliquent des calculs de matrice jacobienne aux interfaces ou de flux numériques complexes, les solutions aux problèmes de Riemann interviennent

très peu dans l'étape Lagrange, essentiellement à travers les vitesses d'interface, épargnant par là-même des calculs coûteux.

La discrétisation du modèle a mené à la mise en place d'un certain nombre de cas-tests, qui ont permis d'observer d'une part, les propriétés et capacités générales du modèle, et d'autre part, l'influence d'évènements météorologiques simulés sur la nature des solutions. En ce qui concerne les propriétés, les expériences permettent de montrer la croissance des instabilités linéaires dans le temps pour une certaine forme du terme source. On montre ainsi que le taux d'instabilité dépend de la constante ρ_0 du modèle. Pour la forme inconditionnellement linéairement stable du terme de relaxation, le modèle exhibe un développement d'instabilités non linéaires dans la région dense, qui traduisent un phénomène physique de type ondes *stop-and-go*. Cet aspect typiquement transitoire est donc bien rendu par le modèle du second ordre et permet ainsi, par rapport à un modèle plus simple, de mieux décrire des situations hors-équilibre. Le développement des instabilités dépend de la valeur du temps de relaxation et cette dépendance prend tout son intérêt dans une expérience introduisant la météorologie, où l'on voit qu'un temps de relaxation plus long lors de conditions pluvieuses mène à un développement d'instabilités linéaires qui n'aurait pas cours en temps normal. Les autres cas-tests montrent bien l'influence notable et logique des phénomènes météorologiques sur les solutions et, ainsi, l'intégration pertinente de la pluie au modèle.

Les modèles macroscopiques constituent la base de bon nombre d'outils d'estimation ou de contrôle qui composent les outils d'aide à la décision pour la gestion du trafic routier. La dernière partie des contributions s'est ainsi attelée à intégrer les nouvelles connaissances des effets météorologiques sur le trafic dans de tels outils. Dans une perspective de gestion en temps réel, de contrôle des flux, ou encore de prévision de temps de parcours, il est souvent nécessaire d'estimer en ligne le vecteur d'état du trafic qui contient les variables macroscopiques décrivant l'écoulement (débits, densités etc.). L'approche par observateur, qui consiste à mettre à jour le vecteur d'état en ligne au fur et à mesure de l'arrivée de nouvelles observations, correspond à un problème typique de filtrage bayésien. Après un passage en revue des différentes méthodes, une méthode de filtre particulière, dite encore méthode de Monte Carlo séquentielle, a été appliquée, couplée à un modèle LWR, sur une section du périphérique lyonnais. L'intégration d'évènements météorologiques dans les simulations a montré les erreurs potentiellement commises en omettant cette composante. A l'inverse, à travers plusieurs scénarios, il est apparu que la prise en compte de modèles météo-sensibles pouvaient sensiblement améliorer ces outils en adaptant les estimations en temps réel aux changements météorologiques.

Limites et perspectives de recherche

Le cheminement proposé, partant de l'analyse de données vers la modélisation, puis de la modélisation vers les applications, n'est pas exempt de critiques de différents ordres, dont la plupart pourraient, il faut l'espérer, se transformer en pistes de recherches stimulantes pour le futur. La limitation du volume de don-

nées est un problème inhérent à toute étude sur le trafic routier mais devient parfois un défi quant il s'agit d'évaluer de surcroît les effets météorologiques sur le trafic routier. Nos études se sont d'ailleurs limitées à un seul phénomène (la pluie), représenté au mieux par trois modalités d'intensité. D'autres phénomènes comme le brouillard ou la neige devront être analysés dans le futur. Si la plupart des quantifications sont concordantes avec les quelques études existantes, il faut continuer les efforts de recueil de données pour arriver à une généralisation des résultats et une analyse parallèle des différences régionales. Dans cette optique, l'arrivée des nouvelles sources de données (données GPS, véhicules traceurs, données issues des téléphones portables, ou données Lagrangiennes de trajectoire), constitue une potentialité importante qui fera appel à des problématiques de fusion et de qualification de données. Dans le chapitre 2, le flou subsistant sur la définition des pelotons devrait mener à de nouvelles contributions, voire de nouveaux paradigmes pour la définition même d'un peloton. Il sera seulement alors possible d'évaluer pertinemment l'impact de mauvaises conditions météorologiques sur la formation de peloton.

Au niveau de la modélisation, le travail effectué dans le chapitre 3 peut être facilement enrichi de plusieurs manières. Les possibilités entr'ouvertes par la formulation Vlasov pourraient ainsi mener au développement de modèles microscopiques qui intégreraient d'une autre façon les résultats obtenus sur la météorologie. De plus, l'aspect multi-classes, multi-voies, et l'ensemble des facteurs liés à l'hétérogénéité du trafic pourraient faire l'objet de développements ultérieurs. Mais le principal manque réside dans la confrontation du modèle à des applications réelles de modélisation d'une section inter-urbaine, avec une application à des données et des conditions variées. Seul ce type d'application pourrait définitivement valider le choix d'un modèle du deuxième ordre par rapport au modèle LWR et certaines considérations sur les temps de relaxation, par exemple. La simplicité et l'efficacité numérique de l'approche à pas fractionnaire, couplée à un schéma Lagrange-projection, pourrait également être prouvée à partir de cas concrets, en procédant par comparaison des performances avec des schémas plus classiques de type Godunov ou Lax-Wendroff.

L'intégration des effets météorologiques dans les outils d'aide à la décision est riche de perspectives. A l'intérieur même de la problématique du filtrage particulaire, les nouvelles voies offertes par les différentes extensions du filtre de Kalman, du filtre de Kalman inodore aux ensembles de filtres de Kalman, ainsi que les récents développements en filtrage particulaire, pourraient trouver dans le trafic routier un terrain d'application idéal. Au delà du filtrage bayésien, l'estimation et la calibration conjointe des paramètres du modèle par des techniques d'enrichissement du vecteur d'état semblent également constituer des suites naturelles au travail présenté dans le chapitre 5. Au regard des résultats proposés, des problématiques nouvelles de couplage méthode/modèle semblent, en outre, se dessiner ; elles pourraient mener à des classifications originales des modèles de trafic. Quel modèle pour quelle méthode ? Si un modèle du deuxième ordre s'adapterait bien à un filtre de Kalman étendu, il n'en sera pas de même pour un modèle LWR de type offre/demande, pour lequel la linéarisation locale soulèverait des difficultés.

Pour conclure cette thèse, soulignons que les perspectives de recherches, ainsi que l'aspect pluri-disciplinaire qu'elle revêt, s'accordent bien aux deux projets, régional et européen, auxquels notre travail s'est associé. Au niveau régional, les résultats permettent d'intégrer les effets météorologiques dans des outils d'estimation de temps de parcours sur les autoroutes rhônes-alpines (projet TPTEO du cluster régional Transports et Sociétés). Au niveau européen, l'effort des partenaires au sein de l'action COST TU0702, qui se concentre sur le développement d'outils d'aide à la décision météo-sensibles et la proposition de stratégies de gestion de trafic associés, est à ce jour encore poursuivi.

Bibliographie

- [1] AAHEIM, H.A. ET HAUGE, K.E., Impacts of climate change on travel habits : a national assessment based on individual choices. In *CICERO Report No. 2005 :07. Center for International Climate and Environmental Research*, Oslo (Norvège), 38 p., 2005.
- [2] AL GHAMDI, Experimental Evaluation of Fog Warning System, *TRB 2004 Annual Meeting CD-ROM*, Washington (USA), 2004.
- [3] AL-KAISY A., DURBIN, C., Platooning on two-lane two-way highways : An empirical investigation. *Journal of Advanced Transportation* 43 (1), pp. 71-88, 2009.
- [4] ANDERSON, TW., On the Distribution of the Two-Sample Cramer-von Mises Criterion. *The Annals of Mathematical Statistics* (Institute of Mathematical Statistics) 33 (3), pp. 1148-1159, 1962.
- [5] ANDREY, J., ET KNAPPER, C. K., Motorists' Perceptions of and Responses to Weather Hazards. In *Weather and Transportation in Canada*, J. Andrey and C. Knapper, eds., *Department of Geography Publication Series No. 55*, University of Waterloo, Ontario (Canada), pp. 95-120, 2003.
- [6] ANDREY J., MILLS, B., LEAHY, M. ET SUGGETT, J., Weather as a Chronic Hazard for Road Transportation in Canadian Cities. *Natural Hazards* 28, pp. 319-343, 2003.
- [7] AW, A. ET RASCLE, M., Resurrection of "second order" models of traffic flow. *SIAM J. Appl. Math.* 60(3), pp. 916-938, 2000.
- [8] AW, A. KLAR, A., MATERNE, T. ET RASCLE, M., Derivation of continuum traffic flow models from microscopic follow-the-leader models, *SIAM J. Appl. Math.* 63, pp. 259-278, 2002.
- [9] BERGSTRÖM, A., ET MAGNUSSON, R., Potential for transferring car trips to bicycle during winter. *Transportation Research Part A* 37, pp. 649-666, 2003.
- [10] BERTHELIN, F., DEGOND, P., DELITALA, M. ET RASCLE, M., A model for the formation and evolution of traffic jams, *Arch. Rational Mech. Anal.* 187, pp. 185-220, 2008.

- [11] BERTHELIN, F., DEGOND, P., LE BLANC, V., MOUTARI, S., RASCLE, M. ET ROYER, J., A traffic-flow model with constraints for the modelling of traffic jams, *Math. Mod. Meth. Appl. Sci.* 18 (Supplement), pp. 1269-1298, 2008.
- [12] BILLOT, R., CHALONS, C., DE VUYST, F., EL FAOUZI, N.-E., SAU, J., A conditionally linearly stable second order traffic model derived from a Vlasov kinetic description. *Compte-Rendu de l'Académie des Sciences , section Mécanique*, 2010.
- [13] BILLOT, R., EL FAOUZI, N.-E., DE VUYST, F., A Multilevel Assessment of Rain Impact on Drivers' Behaviors : Standardized Methodology and Empirical Analysis. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* 2107, pp. 134-142, 2009.
- [14] BILLOT, R., EL FAOUZI, N.-E., SAU, J. AND DE VUYST, F., How does Rain affect traffic indicators? Empirical study on a French interurban motorway. In *Proceedings of the Lakeside Conference*. Klagenfurt (Autriche), 2008.
- [15] BILLOT, R., EL FAOUZI, N.-E., SAU, J., DE VUYST, F., Integrating the Impact of Rain into Traffic Management : Online Traffic State Estimation Using Sequential Monte Carlo Techniques, in *Transportation Research Records : Journal of the Transportation Research Board*, 2010 (in press).
- [16] BONZANI, I. ET MUSSONE, L., From experiments to hydrodynamic traffic flow models : I - Modelling and parameter identification, *Math. and Comp. Modelling* 37, pp. 1435-1442, 2003.
- [17] BRILON, W., PONZLET, M., Variability of Speed-Flow Relationships on German Autobahns, *Transportation Research Record* 1555, pp. 91-98, 1996.
- [18] BROUGHTON, K., SWITZER, F. ET AL., Car following decisions under three visibility conditions and two speeds tested with a driving simulator. *Accident Analysis and Prevention* 39(1), pp. 106-116, 2007.
- [19] BUISSON, C. ET LESORT, J.-B., *Comprendre le trafic routier : méthodes et calculs*. CERTU, 110 p., 2009.
- [20] BULTE, B., Comportement par visibilité réduite. Lille, Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement Nord Picardie, 1985.
- [21] BUTON, J., Etude des effets météorologiques sur la demande, analyse du cas de la section autoroutière Lyon-Chambéry. Rapport de travail de fin d'études, LICIT-INRETS, 2010.
- [22] CHANGNON, S.A., Effects of summer precipitation on urban transportation. *Climatic Change* 32 (4), pp. 481-494, 1996.

- [23] CHENG, P., QIU, Z., QIU, W. ET RAN, B., A particle filter based model for traffic state estimation using simple wireless network data. In *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (ICSOLI2005)*, pp. 10-12, 2005.
- [24] CHIN, S. ET AL., Temporary Losses of Highway Capacity and Impacts on Performance, PRNL/TM-2002/3, Oak Ridge National Laboratory, 2002.
- [25] CHUNG, E., OHTANI, O. ET KUWAHARA, M., Effect of Rainfall on Travel Time and Travel Demand. *5th ITS European Congress*, 8 p, 2005.
- [26] CHUNG, E., OHTANI, O., WARITA, H., KUWAHARA, M. ET MORITA, H., Does weather affect highway capacity? *Proceedings of the Symposium on Highway capacity*, Tokyo (Japon), 2006.
- [27] CODLING, P.J., *Weather and road accidents*. In Taylor, J.A. (Ed.), Climatic Resources and Economic Activity. David and Charles Holdings, Newton Abbot, pp. 205-222, 1974.
- [28] COOLS, M., MOONS, E., WETS, G., Assessing the impact of weather on traffic intensity. In *Proceedings of the 87nd annual meeting of the Transportation Research Board. CDROM. Transportation Research Board of the National Academies*, Washington (USA), 2008.
- [29] COSCIA, V., On a closure of mass conservation equation and stability analysis in the mathematical theory of vehicular traffic flow, *C. R. Mecanique* 332, pp. 585-590, 2004.
- [30] CREMER, M., LUDWIG, J., A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations. *Mathematics and Computers in Simulation* 28, pp. 297-303, 1986.
- [31] DAGANZO, C. F., The cell transmission model : A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory, *Transportation Research B* 28(4), pp. 269-287, 1994.
- [32] DEMAILLY, J.-P., *Analyse numérique et équations différentielles, Manuel pour le Second Cycle de Mathématiques*, Presses Universitaires de Grenoble, 1e édition sept. 1991, 2e éd. sept. 1996, 3e éd. fév. 2006, 344 pages.
- [33] DAGANZO, C. F., Requiem for second-order fluid approximations of traffic flow, *Transp. Res. B.* 29 (4), pp. 277-286, 1995.
- [34] DAGANZO, C. F., In Traffic Flow, Cellular Automata = Kinematic Waves. *Transp. Res. B.* 40 (5), pp. 396-403, 2006.
- [35] DATLA S. ET SHARMA, S., Highway Traffic Volume Variations with Cold and Snows interactions, *Innovation in Traffic Operations and Management Session of*

- the 2007 Annual Conference of the transportation Association of Canada*, 20 p., 2007.
- [36] DEGOND, P. ET DELITALA, M., Modelling and simulation of vehicular traffic jam formation, *Kinetic Related Models* 1, pp. 279-293, 2008.
- [37] DELITALA, M. ET TOSIN, A., Mathematical modelling of vehicular traffic : A discrete kinetic theory approach, *Math. Mod. Meth. Appl. Sci.* 17, pp. 901-932, 2007.
- [38] DELITALA, M., Nonlinear models of vehicular traffic flow - new frameworks of the mathematical kinetic theory, *C. R. Mecanique* 331, pp. 817-822, 2003.
- [39] DE PALMA, A., ET ROCHAT, D., Understanding individual travel decisions : results from a commuters survey in Geneva. *Transportation A.* 26, pp. 263-281, 1999.
- [40] DOUCET, A., DE FREITAS, N., GORDON, N.J., *Sequential Monte Carlo Methods in Practice*. Springer. 2001.
- [41] DURET, A., BUISSON, CH., CHIABAUT, N., Estimation individual speed-spacing relationship and assessing the Newell's car-following model ability to reproduce trajectories, *Transportation Research Record* 2088, pp. 188-197, 2008.
- [42] EISENBERG, D., The mixed effects of precipitation on traffic crashes, *Accident Analysis and Prevention* 36 (4), pp. 637-647, 2004.
- [43] EL FAOUZI N.-E., *Research Needs for Real Time Monitoring, Surveillance and Control of Road Networks under Adverse Weather Conditions*, Research Agenda for the European Cooperation in the field of scientific and technical research (COST), 2007.
- [44] EL FAOUZI N.-E., DE MOUZON, O. ET BILLOT, R., Toward Weather-Responsive Traffic Management on French Motorways, *In proceedings of the fourth national conference on surface transportation weather, Transportation Research E-Circular E-C126, Indianapolis*, pp. 443-456, 2008.
- [45] EL FAOUZI, N.-E., DE MOUZON, O., BILLOT, R., SAU, J., Assessing individual driver behaviour and macroscopic traffic changes due to the weather conditions. *Advances in Transportation Studies, An International Journal*, 2010.
- [46] EL FAOUZI, N.-E., KLEIN, L.A. ET DE MOUZON, O., Improving travel time estimates from inductive loop and toll collection data with Dempster-Shafer data fusion, *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* 2129, pp. 73-80, 2009.
- [47] EDWARDS, J.-B., Speed adjustment of motorway commuter traffic to inclement weather, *Transportation Research Part F* 2, pp. 1-14, 1999.

- [48] EVENSEN, G., The Ensemble Kalman Filter : theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics* 53 (4), pp. 343-367, 2003.
- [49] FHWA. *Road Weather Management Overview*.
<http://ops.fhwa.dot.gov/Weather/> Accédé le 20 Aout 2010.
- [50] GALIN, D., Speed on Two Lane Rural Roads, A Multiple Regression Analysis, *Traffic Engineering and Control* 22, pp. 453-460, 1981.
- [51] GAZIS, D., HERMAN, R. ET ROTHERY R., Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. *Operations Research* 9, pp. 545, 1961.
- [52] GOATIN, P., The Aw-Rascle vehicular traffic flow model with phase transitions, *Math. Comput. Modeling* 44, pp. 287-303, 2006.
- [53] GODLEWSKI, E., RAVIART, P.A., *Hyperbolic systems of conservation laws* ,
Collection Mathématiques et Applications de la SMAI, Ellipses, Paris, 1991.
- [54] GOODWIN, L.-C., *Analysis of Weather-Related Crashes on U.S. Highways*,
Mitretek Systems, December, 2002.
- [55] GREENSHIELDS, B. D., *Proceedings of the Highway Research Board (Highway Research Board, Washington (USA))* 14, pp. 448, 1935.
- [56] GREENBERG, H., *Operation Research* 7, pp. 79, 1959.
- [57] HALL, F. ET BARROW, D., The effect of weather on the relationship between flow and occupancy on freeways. *Transportation Research Record* 1194, pp. 55-63, 1988.
- [58] HANBALI, R. M., ET KUEMMEL, D. A., Traffic Volume Reductions Due to Winter Storm Conditions. *Transportation Research Record* 1387, pp. 159-164, 1993.
- [59] HANSEN, B.G., MARTIN, P.T, PERRIN, H.J., ET MELDRUM, D., Delivering Road Weather Information to Traveling Public. *Transportation Research Record* 1745, pp. 46-52, 2001.
- [60] HANSON, S., ET HANSON, P., Evaluating the impact of weather on bicycle use. In *Transportation Research Record* 629 , pp. 43-48, 1977.
- [61] AL HASSAN, Y., AND BARKER, D.J., The impact of unseasonable or extreme weather on traffic activity within Lothian Region, Scotland. *Journal of Transport Geography* 7, pp. 209-213, 1999.
- [62] HEGYI, A., GIRIMONTE, D., BABUSKA, R. ET DE SCHUTTER, B., A comparison of filter configurations for freeway traffic state estimation, *Proceedings of the 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC 2006)*, pp. 1029-1034, 2006.

- [63] HEGYI, A., MIHAYLOVA, L., BOEL, R., LENDEK, Zs., Parallelizable Particle Filtering for Freeway Traffic State Estimation, *Proceedings of the European Control Conference*, pp. 2442-2449, 2007.
- [64] HELBING, D. ET JOHANSSON, A., On the controversy around Daganzo's requiem for and Aw-Rascle's resurrection of second-order traffic flow models, *European Physical Journal B* 69(4), pp. 549-562, 2009.
- [65] HELBING, D., Traffic and related self-driven many-particle systems, *Rev. Modern Phys* 73, pp. 1067-1141, 2001.
- [66] HERTY, M. ET ILLNER, R., On Stop-and-Go waves in dense traffic, *Kinetic and related models AIMS* 1(3), pp. 437-452, 2008.
- [67] Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, Washington (USA), ISBN 0-309-06681-6, 2000.
- [68] HOGEMA, J.H., Effects of rain on daily traffic volume and on traffic behavior. Report TM-96-B019, TNO Human Factors Research Institute, Netherlands, 14 p., 1996.
- [69] HOOGENDOORN, S.P., Multiclass Continuum Modelling of Multilane Traffic Flow. PhD Thesis, Delft University of Technology. Delft University Press, Delft (Pays-Bas), 1999.
- [70] HOOGENDOORN, R., HOOGENDOORN, S., BROOKHUIS, K., DAAMEN, W., Adaptation Effects in case of Fog : Performance and Parameter Value Effects in Simple and Multi-anticipative Car-following Models, *Proceedings of the TRB Traffic Flow Theory Committee Summer Meeting*, 2010.
- [71] HRANAC, R., STERZIN, E., KRECHMER, D., RAKHA, H. ET FARZANEH, M., *Empirical Studies on Traffic Flow in Inclement Weather*, Publication No. FHWA-HOP-07-073 October. 2006.
- [72] IBRAHIM, A.-T., HALL, F.-L., Effect of Adverse Weather Conditions on Speed-Flow-Occupancy Relationships, *Transportation Research Record* 1457, pp. 184-191, 1994.
- [73] ILLNER, R., KIRCHNER, C., PINNAU, R., A derivation of the Aw-Rascle traffic models from Fokker-Planck type kinetic models, *Quart. Appl. Math.* 67, pp. 39-45, 2009.
- [74] ILLNER, R., KLAR, A. ET MATERNE, T., On Vlasov-Fokker-Planck type kinetic models for multilane traffic flow, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Eds.Ph. Muntz and A. Ketsdever, 2003.

- [75] JONES, E. R., GOOLSBY, M. E. ET BREWER, K. A., The environmental influence of rain on freeway capacity. In *Highway Research Record* 321, pp. 74-82, 1970.
- [76] JULIER, S.J., UHLMANN, J.K., A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems. *Int. Symp. Aerospace/Defense Sensing, Simul. and Controls*, 1997.
- [77] KALMAN, R. E., A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering* 82 (D), pp. 35-45, 1960.
- [78] KARKOWSKI, M., *INTRO (Intelligent Roads). Integration of weather effects for traffic indicators forecasting*. Deliverable 4.2, Fehrl/IBDiM, Poland, 2006.
- [79] KEAY K. ET SIMMONDS, I., The association of rainfall and other weather variables with road traffic volume in Melbourne, Australia. *Accident Analysis and Prevention* 37, pp. 109-124, 2005.
- [80] KHATTAK, A., Driver response to unexpected travel conditions : effect of traffic information and other factors. PhD dissertation, Civil Engineering Department, Northwestern University, Evanston, Illinois (USA), 1991.
- [81] KHATTAK, A.J., ET DE PALMA, A., The impact of adverse weather conditions on the propensity to change travel decisions : a survey of Brussels commuters. *Transportation Research Part A* 31, pp. 181-203, 1997.
- [82] KILPELÄINEN, M. AND SUMMALA, H., Effects of weather and weather forecasts on driver behavior. *Transportation Research Part F* 10 (4), pp. 288-299, 2007.
- [83] KLAR, A. ET WEGENER, R., Kinetic Derivation of Macroscopic Anticipation Models for Vehicular Traffic. *SIAM J. Appl. Math.* 60, pp. 1749-1766, 2000.
- [84] KLAR, A. ET WEGENER, R., Enskog-like Kinetic models for vehicular traffic, *Journal of Statistical Physics* 87(1-2), pp. 91-114, 1997.
- [85] KNAPP, K.K. ET SMITHSON, L.D., Winter storm event volume impact analysis using multiple-source archived monitoring data. In *Transportation Research Record* 1700, pp. 10-16, 2000.
- [86] KOETSE, M.J., ET RIETVELD, P., Climate change, Adverse Weather Conditions, and Transport : A Literature Survey. Study of the Vrije Universiteit, Department of Spatial Economics, Amsterdam, 23 p., 2007.
- [87] KOETSE, M.J., ET RIETVELD, P., The impact of climate change and weather on transport : an overview of empirical findings. In *Transportation Research Part D* 14, pp. 205-221, 2009.

- [88] KULMALA, R. ET KARHUMÄKI, T., VIKING Monitoring Guidelines (2005). Euro-regional project VIKING MIP2005 Deliverable, version 1.0 March 2006.
- [89] KYTE, M., KHATIB, Z., SHANNON, P., KITCHENER, F., Effect of Weather on Free-Flow Speed, *Transportation Research Record* 1776, pp. 60-68, 2001.
- [90] LAMM, R., CHOUERIE, M., ET MAILAENDER, T., Comparison of Operating Speeds on Dry and Wet Pavements of Two-Lane Rural Highways, *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* 1280, pp. 199-207, 1990.
- [91] LAVIOLA, J., A Comparison of Unscented and Extended Kalman Filtering for Estimating Quaternion Motion, *Proceedings of the 2003 American Control Conference, IEEE Press*, pp. 2435-2440, 2003.
- [92] LEBACQUE, J.P., MAMMAR, S. ET HAJ-SALEM, H., The Aw-Rascle and Zhang models : Vacuum problems, existence and regularity of the solutions of the Riemann problem, *Transport. Res. B* 41, pp. 710-721, 2007.
- [93] LEBACQUE J.P., The Godunov scheme and what it means for first order traffic flow models, *Transportation and Traffic Theory, proceedings of the 13th ISTTT (J.B. Lesort ed.)*, Elsevier, pp. 647-677, 1996.
- [94] LE BRETON P., *Study of the rain impact on road safety (main roads and motorways). Statistical analysis*. Note d'information SETRA-CSTR N° 77. 1990.
- [95] *Les capteurs de trafic routier. Guide technique*, SETRA, 1995.
- [96] LIANG, W.-L., KYTE, M., KITCHENER, F., ET SHANNON, P., Effect of Environment Factors on Driver Speed, *Transportation Research Record* 1635, pp. 155-161, 1998.
- [97] LIGHTHILL, M.H., WHITHAM, G.B., On kinematic waves II : a theory of traffic flow on long, crowded roads, *Proceedings of The Royal Society of London Ser. A* 229, pp. 317-345, 1955.
- [98] LIN, Q., NIXON, W., Effects of Adverse Weather on Traffic Crashes : Systematic Review and Meta-Analysis, In *Proceedings of the 87nd annual meeting of the Transportation Research Board. CDROM. Transportation Research Board of the National Academies*, Washington (USA), 2008.
- [99] LUTTINEN, R., Statistical Analysis of Vehicular Time Headways, Ph.D. thesis, University of Technology Lahti Center (Neopoli, Lahti, Finland), 1996.
- [100] MAKI, P. J., Adverse Weather Traffic Timing, *ITE Annual Meeting, Institute of Transportation Engineers*, 8 p., 1999.

- [101] MAZE, T.H., AGARWAL, M. ET BURCHETT, G., Whether Weather Matters to Traffic Demand, Traffic Safety, and Traffic Operations and Flow. *Transportation Research Record* 1948, pp. 170-176, 2006.
- [102] MIHAYLOVA, L. ET BOEL, R., A particle filter for freeway traffic estimation, *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2106-2111. 2004.
- [103] MIHAYLOVA, L., BOEL, R. ET HEGYI, A., Freeway Traffic Estimation within Recursive Bayesian Framework, *Automatica* 43 (2), pp. 290-300, 2007.
- [104] MARCHUK, G.I., *Splitting and alternating direction methods*. In : Ciarlet, P.G., Lions, J.L. (Eds.), *Handbook of Numerical Analysis*, vol. 1. North-Holland, Amsterdam. pp. 199-460.
- [105] MARKKU, K., HEIKKI, S., Effects of weather and weather forecasts on driver behavior, *Transportation Research Part F* 10, pp. 288-299, 2007.
- [106] MUSY, A., Cours d'hydrologie générale, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/main.html>, accédé le 2 Octobre 2010.
- [107] NAGEL, K., SCHRECKENBERG, M., A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic. *Journal de Physique I France* 2(33), pp. 2221-2229, 1992.
- [108] NELSON, P. ET SOPASAKIS, A., The Chapman-Enskog expansion : A novel approach to hierarchical extension of Lighthill-Whitham models, *A. Ceder (Ed.) Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT)*, pp. 51-79, 1999.
- [109] NEWELL, G.F., Nonlinear effects in the dynamics of car-following, *Oper. Res.* 9, pp. 209-229, 1961.
- [110] NEWELL, G.F., A simplified car-following theory : a lower order model, *Transportation Research Part B : Methodological* 36 (3), pp. 195-205, 2002.
- [111] OKAMOTO, N., ISHIDA, H., FURUYA, H., ET FURUKAWA, K., Including Weather Condition Factors in the Analysis on the Highway Capacity, *TRB 2004 Annual Meeting CD-ROM*, 2004.
- [112] ONISR. *The major themes of road safety : rain (results 1995-2004)*, 2005.
- [113] PAPAGEORGIU, M., Some remarks on macroscopic traffic flow modelling, *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 32 (5), pp. 323-329, 1998.
- [114] PAPAGEORGIU, M., Dynamic modeling, assignment, and route guidance in traffic networks. *Transportation Research Part B : Methodological* 24 (6), pp. 471-495, 1990.

- [115] PAVERI-FONTANA, S.L., On Boltzmann like treatments for traffic flow. A critical review of the basic model and an alternative proposal for dilute traffic analysis, *Transp. Res.* 9 (4), pp. 225-235, 1975.
- [116] PAYNE, H.J., Models of freeway traffic and control, *Mathematical Models of Public Systems. Simulation Council Proceedings Series* 28 (1), pp. 51-61, 1971.
- [117] PERRIN, J. ET MARTIN, P., Modifying Signal Timing during Inclement Weather, University of Utah Traffic Lab, *presented at the 2002 Institute of Transportation Engineers Annual Meeting*, 2002.
- [118] PIPES, L. A., An Operational Analysis of Traffic Dynamics. *J. Appl. Phys.* 24(3), pp. 274-281, 1953.
- [119] PISANO, P.-A., ET GOODWIN, L.-C., Research Needs for Weather-Responsive Traffic Management, *TRB 2004 Annual Meeting*, 2004.
- [120] MAY, A.-D., *Capacity and Level of Service for Freeway Systems*, Third Interim Report, June 12, 1998.
- [121] PRIGOGINE, I. ET ANDREWS, F.C., A Boltzmann-like approach for traffic flow, *Operational Research* 8 (6), pp. 789-797, 1960.
- [122] PRIGOGINE, I. ET HERMAN, R., *Kinetic theory of vehicular traffic*, American Elsevier Publishing Co., New York, 1st Edition, 1971.
- [123] PUSHPAKUMARA, T D-C., KUWAHARA, M., CHUNG E. ET EL FAOUZI, N.-E., Effect of Rainfall strength on Accuracy of Travel Time prediction model, *World Congress on Transport Research (WCTR)*, 2007.
- [124] RAKHA, H., FARZANEH, M., ARAFEH, M. ET STERZIN, E., Inclement Weather Impacts on Freeway Traffic Stream. *Proceedings of the 87nd annual meeting of the Transportation Research Board. CDROM. Transportation Research Board of the National Academies*, 2008.
- [125] RIES, G.-L., *Impact of Weather on Freeway Capacity*, Minnesota Department of Transportation, Office of Traffic Engineering, Systems and Research Section, Minneapolis, Minnesota (USA), January 1981.
- [126] RANKINE, W. J. M., On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbances, *Phil. Trans. Roy. Soc. London* 160 (2), pp. 277-288, 1870.
- [127] SABIR, M., KOETSE, M.J ET RIETVELD, P., The impact of weather conditions on mode choice decisions : empirical evidence for the Netherlands, *Forthcoming as Tinbergen Institute Discussion Paper.*, 24 p., 2008.

- [128] SAU J., EL FAOUZI N.-E., DE MOUZON O., Particle-Filter Traffic State Estimation and Sequential Test for Real-Time Traffic Sensor Diagnosis. *Proceedings of the ISTS'08 Symposium, Queensland*, 2008.
- [129] SIHVOLA, N., Driver assessment of road weather conditions and road weather information. *Proceedings of the Young Researchers Seminar 2009*, 2009.
- [130] SMITH, B.-L., BRYNE, K.-G., COPPERMAN, R.-B., HENNESSY, S.-M. ET GOODALL, N.-J., An Investigation into the Impact of Rainfall on Freeway Traffic Flow, *TRB 2004 Annual Meeting CD-ROM*, 2004.
- [131] SNOWDEN, R., STIMPSON, N. ET AL., Speed perception fogs up as visibility drops. *Nature* 392(6675), pp. 450, 1998.
- [132] SOPASAKIS, A., Stochastic noise approach to traffic flow modeling, *Physica A* 342, pp. 741-754, 2004.
- [133] STERZIN, E. D., Modeling Influencing Factors in a Microscopic Traffic Simulator, Masters Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (USA), 2004.
- [134] SUMNER, R., BAGULEY, C. ET AL., Driving in fog on the M4. Crowthorne, Transport and Road Research Laboratory. 1977.
- [135] TAMPÈRE, C., VAN AREM, B. ET HOOGENDOORN, S., Gas kinetic traffic flow modelling including continuous driver behaviour models, *Transportation Research Record* 1852, pp. 231-238, 2004.
- [136] TANNER, J.C., Effect of Weather on Traffic Flow. *Nature* 4290, pp. 107, 1952.
- [137] UNDERWOOD, R. T., *Speed, Volume, and Density Relationships. Quality and Theory of Traffic Flow*. Yale Bureau of Highway Traffic, pp. 141-188, 1961.
- [138] UNRAU, D., ANDREY, J., Driver response to rainfall on urban expressways, *Transportation Research Record* 1980, pp. 24-30, 2006.
- [139] VAN AERDE M. ET RAKHA H., Multivariate Calibration of Single-Regime Speed-Flow-Density Relationships, *Vehicle Navigation and Information Conference (VNIS). IEEE*, pp. 334-341, 1995.
- [140] VAN LEER, B., Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, V. A Second Order Sequel to Godunov's Method, *J. Comput. Phys.* 32, pp. 101-136, 1979.
- [141] WALD, A., *Sequential Analysis*, Dover, New York 1973.
- [142] WAN, E. A., VAN DER MERWE, R., The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation, *Proceedings of Symposium 2000 on Adaptive Systems for Signal Processing, Communication and Control (AS-SPCC)*, IEEE, 2000.

- [143] WANG, Y., PAPAGEORGIOU, M., MESSMER, A., Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter : A case study, *Transportation Science* 41, pp. 167-181, 2007.
- [144] WANG, Y., PAPAGEORGIOU, M., MESSMER, A., COPPOLA, P., TZIMITSI, A., ET NUZZOLO, A., An adaptive freeway traffic state estimator, *Automatica* 45 (1), pp.10-24, 2009.
- [145] WHITE, M. ET JEFFERY, D., Some aspects of motorway traffic behavior in fog. Crowthorne, Transport and Road Research Laboratory, 1980.
- [146] YANENKO, N.N., *The Method of Fractional Steps. The Solution of Problems of Mathematical Physics in Several Variables*, Springer, New York, Heidelberg, 1971.
- [147] ZHANG, H.M., A non-equilibrium traffic model devoid of gas-like behavior. *Transportation Research part B* 36, pp. 275-290, 2002.
- [148] ZHANG, L., ET PREVEDOUROS, P.D., Motorist Perception on the Impact of Rainy Conditions on Driver Behavior and Accident Risk. *Transportation Research Board 2005 Annual Meeting CD-ROM*, 23 p., 2005.

Liste des figures

1	Architecture générale de la thèse et découpage du travail réalisé.	7
2	Diagramme fonctionnel de l'action COST TU0702.	8
1.1	Propositions de Greenschild pour la forme du diagramme fondamental [55].	12
1.2	Diagramme fondamental triangulaire.	13
1.3	Photo de boucles électromagnétiques (réseau OFROU, suisse).	15
1.4	(a) Station météorologique standard. (b) Station météo-routière. [106].	16
1.5	Modifications possibles des choix de déplacement en cas de conditions météorologiques dégradées (adapté de [21] avec la permission de l'auteur).	19
1.6	Réduction des volumes de trafic en fonction du niveau de pluie et du jours de la semaine (reproduit à partir de [25]).	22
1.7	Distribution des temps inter-véhiculaires pour un régime de débit de 500-600 veh/h. Suisse, site 226, voie 8, Projet INTRO [78].	24
1.8	Réductions des vitesses moyennes pour la voie 1, site 149, données suisses. Projet INTRO [78].	26
1.9	Réductions des capacités sur le réseau MEX de Tokyo en fonction de l'intensité de la pluie [26].	28
1.10	Modification de la relation débit-taux d'occupation en fonction de l'intensité du phénomène météorologique [101].	29
1.11	Relation vitesse/débit pour différentes intensités de précipitation. (a) Projet INTRO [78] et (b) données japonaises du réseau MEX [26].	30
2.1	Site d'études 1 : autoroute A9, France	35
2.2	Répartition des véhicules par voie : autoroute A9, France.	37
2.3	TIV moyen (en secondes) selon la configuration suiveur/suivant (à gauche). Distribution des DIV sur la voie rapide (à droite) : autoroute A9, France	38
2.4	Tracé de l'autoroute A6 Paris-Lyon.	39
2.5	Chronique de la fraction de véhicules légers dans le flot sur les 15 jours de données disponibles. Données APRR.	39
2.6	Evolution de la vitesse libre en fonction du pourcentage de véhicules légers par modalité de précipitation. Données APRR.	40
2.7	Cadre méthodologique pour l'analyse de l'impact météorologique sur le trafic.	42
2.8	Relation vitesse/débit pour deux capteurs différents, jour similaire, données CORALY . (a) Anomalies apparentes avec vitesses excessives et (b) Profil normal.	43

2.9	Illustration de la notion de peloton.	45
2.10	Interfaçage MySQL/R	47
2.11	Description de la section de recueil des données RN118 (5 premières stations).	48
2.12	Descriptifs des données suisses de l'OFROU.	49
2.13	Code des 4 voies et sens de circulation. Données suisses de l'OFROU.	51
2.14	Répartition générale des véhicules dans les deux directions. Données OFROU.	52
2.15	Répartition par type de véhicule pour la direction Zurich. Données OFROU.	53
2.16	Répartition des vitesses sur les deux voies de circulation. Données N118.	54
2.17	Répartition des vitesses pour les deux directions. (a) histogramme et (b) boîtes à moustaches associées. Données suisses.	55
2.18	Répartition des distances inter-véhiculaires sur les deux voies de circulation. Données N118.	56
2.19	Répartition des distances inter-véhiculaires sur les deux voies de circulation, (a) voie 3 (lente) et (b) voie 4 (rapide). Données OFROU, direction Berne.	57
2.20	Répartition des temps inter-véhiculaires sur la RN118, voie lente.	58
2.21	Modélisation des temps inter-véhiculaires sur la RN118 par une loi log-normale, voie lente. (a) fonctions de densité et (b) fonctions de répartition.	59
2.22	Modélisation log-normale des temps inter-véhiculaires des données suisses (a) voie lente et (b) voie rapide. Données OFROU.	59
2.23	Variation du nombre moyen de véhicules dans un peloton en fonction de la météorologie et du TIV critique.	60
2.24	Boîtes à moustaches des vitesses moyennes spatiales des pelotons. Données RN118. (a) voie lente et (b) voie rapide.	61
2.25	Tracé du nuage de points brut des données agrégées dans le plan vitesse/débit. Véhicules légers, voie rapide. Données RN118.	63
2.26	Calibrage du modèle de Van Aerde. Véhicules légers, voie rapide. Données RN118.	64
3.1	Modèle de Greenshields. Relation parabolique débit/densité.	72
3.2	Autres formes du diagramme fondamental	72
3.3	Modèles LWR et discontinuités. (a) cas d'un trafic fluide rencontrant un trafic dense et (b) cas inverse.	73
3.4	La modélisation du trafic. Des niveaux de modélisation communicants.	79
3.5	Volume se déplaçant au cours du temps dans l'espace des phases	82
3.6	Paramétrage d'un diagramme fondamental triangulaire	91
3.7	Paramétrage de la distribution des temps inter-véhiculaires.	95
4.1	Approche Lagrange+remap : après l'étape Lagrange, nécessité d'une projection conservative.	104
4.2	Nature des solutions aux interfaces avec $\rho_0 \geq \rho$	105
4.3	Quantités connues à la fin de l'étape Lagrange.	106
4.4	Information manquante en amont.	106

4.5	Solutions en entrée et sortie d'un front de densité. Profils de densité et vitesse moyenne au temps $t = 0.1$, (a) Pour un profil de densité croissant et (b) pour un profil de densité décroissant.	108
4.6	Croissance des instabilités linéaires dans la région dense pour $\alpha = 0$ et $\rho_0 = \frac{1}{2}\rho_M$. Profils de densité et vitesse moyenne, (a) au temps $t = 0.002$ et (b) au temps $t = 0.1$	109
4.7	Absence d'instabilités linéaires pour une grande valeur de ρ_0 . Profils de densités et vitesses moyennes, (a) au temps $t = 0.002$ et (b) au temps $t = 0.1$	110
4.8	Développement d'instabilités non linéaires dans la région de trafic congestionnée.	110
4.9	Effet du paramètre de relaxation, cas $\alpha = 1$. Profils des densité et vitesse moyennes au temps $t = 1$, (a) pour $\ell = 10^{-7}$, (b) pour $\ell = 10^{-6}$, (c) pour $\ell = 10^{-5}$ et (d) pour $\ell = 10^{-4}$	111
4.10	Initialisation d'un créneau de pluie en espace : le front pluvieux est localisé soit sur l'ensemble de la deuxième partie de la section, soit sur la première	112
4.11	Régime dense : flot de véhicules entrant dans une section pluvieuse. Profils de densités et vitesses moyennes au temps $t = 0.015$	113
4.12	Régime dense : flot de véhicules sortant d'une section pluvieuse. Profils de densités et vitesses moyennes au temps $t = 0.015$	114
4.13	Régime fluide : flot de véhicules entrant dans une section pluvieuse. Profils de densités et vitesses moyennes au temps $t = 0.015$	115
4.14	Régime fluide : flot de véhicules sortant d'une section pluvieuse. Profils de densités et vitesses moyennes au temps $t = 0.015$	115
4.15	Initialisation d'une densité entre les deux densités critiques : changements de régimes de trafic et météorologiques	116
4.16	Flot de véhicules entrant dans une section pluvieuse : passage d'un régime fluide à un régime dense. Profils de densité et vitesse moyenne au temps $t = 0.015$	117
4.17	Flot de véhicules sortant d'une section pluvieuse : passage d'un régime dense à un régime fluide. Profils de densité et vitesse moyenne au temps $t = 0.015$	117
4.18	Cas stationnaire : initialisation d'un front pluvieux centré.	118
4.19	Cas stationnaire : le débit est constant et la densité et la météorologie sont initialisées de façon à se déplacer de la gauche vers la droite	118
4.20	Solutions numériques du cas stationnaire.	119
4.21	Initialisation du front de pluie et profils de temps inter-véhiculaires en espace au temps $t = 0.015$	120
4.22	Profils de TIV courts (1.5s) et moyens (5s) sur la section au temps $t = 0.015$	120
4.23	Terme de relaxation faible : profils de densités et vitesses au temps $t = 0.015$	121
4.24	Temps de relaxation dépendant de la météo : développement d'instabilités non linéaires dans la région dense. Profils de densités et vitesses moyennes, (a) au temps $t = 0.015$ et (b) au temps $t = 0.03$	122

5.1	Discrétisation de la section	138
5.2	Fonctions de demande et d'offre	139
5.3	Discrétisation de la section	141
5.4	Profils de débits quotidiens moyens pour les mardi et jeudi de mars 2007	142
5.5	Diagramme vitesse/débit de quatre capteurs dans le sens Nord-Sud. Données CORALY	145
5.6	Scénario 1 : conditions pluvieuses sur toute la section entre 6 et 10h . .	146
5.7	Scénario 1 : erreurs d'estimation sur le capteur 4 entre 6 et 10h. (a) comparaison estimations/mesures et (b) test de Wald associés	146
5.8	Scénario 1 : Estimations après adaptation à la pluie (a) comparaison estimations/mesures, (b) test de wald associés, (c) QQ-plots avant cor- rection (d) QQ-plots après correction	147
5.9	Scénario 2 : conditions pluvieuses pour le capteur 6 seulement entre 16 et 20h	148
5.10	Scénario 2 : Erreurs d'estimation pour un évènement local. (a) pour le capteur 2, (b) pour le capteur 6, (c) et (d) Tests de Wald associés aux capteurs 2 (c) et 6 (d)	148
5.11	Scénario 2 : correction des paramètres du diagramme fondamental au bon endroit grâce à la procédure de détection. (a) P-values des tests de Cramer Von Mises successifs (b) Statistiques des tests successifs de Cramer Von Mises (c) et (d) Estimations corrigées pour les capteurs 6 et 2	150

INRETS/RR/10-572-FR