

19th EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT2016, 5-7 September 2016,
Istanbul, Turkey

Investigation Empirique de l'Existence de l'Equilibre Utilisateur Statique

Juste Raimbault ^{a,b,*}

^aUMR CNRS 8504 Géographie-cités, 13 rue du Four, 75006 Paris, France

^bUMR-T IFSTTAR 9403 LVMET, Cité Descartes, 77455 Champs-sur-Marne, France

Abstract

L'Equilibre Utilisateur Statique est un cadre puissant pour l'étude théorique du trafic. Malgré l'hypothèse restreignante de stationnarité des flots qui intuitivement limite son application aux systèmes de trafic réels, de nombreux modèles opérationnels qui l'implémentent sont toujours utilisés sans validation empirique de l'existence de l'équilibre. Nous étudions celle-ci sur un jeu de données de trafic couvrant trois mois sur la région parisienne. L'implémentation d'une application d'exploration interactive de données spatio-temporelles permet de formuler l'hypothèse d'une forte hétérogénéité spatiale et temporelle, guidant les études quantitatives. L'hypothèse de flots localement stationnaires est invalidée en première approximation par les résultats empiriques, comme le montrent une forte variabilité spatio-temporelle des plus courts chemins et des mesures topologiques du réseau comme la centralité de chemin. De plus, le comportement de l'index d'autocorrelation spatiale pour les motifs de congestion à différentes portées spatiales suggère une évolution chaotique à l'échelle locale, en particulier lors des heures de pointe. Nous discutons finalement les implications de ces résultats empiriques et proposons des possibles développements futurs basés sur l'estimation de la stabilité dynamique au sens de Lyapounov des flots de trafic.

© 2016 The Authors. Published by Elsevier B.V.

Peer-review under responsibility of the Scientific Committee of EWGT2016.

Keywords : Equilibre Utilisateur Statique, Visualisation de Données Spatio-temporelles, Stationnarité Spatio-temporelle, Stabilité Dynamique

1. Introduction

La modélisation du trafic a été largement étudiée depuis les travaux séminaux de Wardrop (Wardrop (1952)) : les enjeux économiques et techniques justifient entre autre le besoin d'une compréhension fine des mécanismes régissant les flots de trafic à différentes échelles. Différentes approches aux objectifs différents coexistent aujourd'hui, parmi lesquels on trouve par exemple les modèles dynamiques de micro-simulation, généralement opposés aux techniques de basant sur l'équilibre. Tandis que la validité des modèles microscopiques a été étudiée de façon conséquente et leur application souvent questionnée, la littérature est relativement pauvre en études empiriques assurant l'hypothèse d'équilibre stationnaire du cadre de l'Equilibre Utilisateur Statique (EUS). De nombreux développements plus réa-

* Auteur correspondant. Tel. : +33140464000.

E-mail address : juste.raimbault@polytechnique.edu

listes on été documentés dans la littérature, tels l'Equilibre Utilisateur Dynamique Stochastique (EUDS) (voir pour une description par exemple Han (2003)). A un niveau intermédiaire entre les cadres statiques et stochastiques se trouve l'Equilibre Utilisateur Stochastique Restreint, pour lequel les choix d'itinéraire des utilisateurs sont contraints à un ensemble d'alternatives réalistes (Rasmussen et al. (2015)). D'autres extensions prenant en compte le comportement de l'utilisateur via des modèles de choix ont été proposé plus récemment, comme Zhang et al. (2013) qui inclut à la fois l'influence de la tarification routière et de la congestion sur le choix avec un modèle Probit. La relaxation d'autres hypothèses restrictives comme la maximisation pure de l'utilité par l'utilisateur ont aussi été introduites, tels l'Equilibre Utilisateur Borné décrit par Mahmassani and Chang (1987). Dans ce cadre, l'utilisateur est satisfait si son utilité tombe dans un intervalle et l'équilibre est achevé lorsque chaque utilisateur est satisfait. Les dynamiques résultantes sont plus complexes comme révélé par l'existence d'équilibres multiples, et permet de rendre compte de faits stylisés spécifiques comme des évolutions irréversibles du réseau comme développé par Guo and Liu (2011). D'autres modèles d'attribution de trafic inspirés d'autres domaines ont également été plus récemment proposés : dans Puzis et al. (2013), une définition étendue de la centralité de chemin qui combine linéairement la centralité des flots non-contraints avec une centralité pondérée par le temps de parcours permet d'obtenir une forte corrélation avec les flots de trafic effectifs, fournissant ainsi un modèle d'attribution de trafic. Cela fournit également des applications pratiques comme l'optimisation de la distribution spatiale des capteurs de trafic.

Malgré ces nombreux développements, de nombreuses études et applications concrètes se reposent toujours sur l'Equilibre Utilisateur Statique. La région parisienne utilise par exemple un modèle statique (MODUS) pour gérer et planifier le trafic. Leurent and Boujnah (2014) introduit un modèle statique de flots qui inclut les recherches locales et le choix du parking : il est légitime de s'interroger, en particulier à de si faibles échelles, si la stationnarité de la distribution des flots est une réalité. Une exemple d'exploration empirique des hypothèses classiques est donné par Zhu and Levinson (2010), pour lequel les choix d'itinéraires révélés sont étudiés. Les conclusions questionnent le "premier principe de Wardrop" qui implique que les utilisateurs choisissent parmi un ensemble d'alternatives parfaitement connu. Dans le même esprit, nous étudions l'existence possible de l'équilibre en pratique. Plus précisément, l'EUS suppose une distribution stationnaire des flots sur l'ensemble du réseau. Cette hypothèse reste valable dans le cas d'une stationnarité locale, tant que l'échelle temporelle d'évolution des paramètres est considérablement plus grande que les échelles typiques de voyage. Le second cas qui est plus plausible et de plus compatible avec les cadres théoriques dynamiques est testé ici.

La suite de ce travail s'organise ainsi : la procédure de collection de données ainsi que le jeu de données sont décrits ; nous présentons ensuite une application interactive pour l'exploration du jeu de données, dans le but de fournir une intuitions sur les motifs présents ; puis nous donnons divers résultats d'analyses quantitatives allant dans le sens d'indices convergents pour une non-stationnarité des flots de trafic ; nous discutons finalement les implications de ces résultats et des développements possibles.

2. Collecte des données

2.1. Construction du jeu de données

Nous proposons de travailler sur l'étude de cas de la région métropolitaine de Paris. Un jeu de données ouvert a été construit, comprenant les liens autoroutiers dans la région, par collecte des données publiques en temps réel des temps de parcours (disponible sur www.sytaadin.fr). Comme rappelé par Bouteiller and Berjoan (2013), la disponibilité de jeux de données ouverts pour les transports est loin d'être la règle, et nous contribuons ainsi à une ouverture par la construction de notre jeu de données. La procédure de collecte de données consiste en les points suivants, exécutés toutes les deux minutes par un script python :

- récupération de la page web brute donnant les informations de trafic
- parsing du code html afin de récupérer les identifiants des liens de trafic et les temps de parcours correspondants
- insertion des liens dans une base `sqlite` avec le temps courant.

Le script automatisé de collection des données continue d'enrichir la base au fur et à mesure du temps, permettant des développements futurs de ce travail sur un jeu de données plus large, et une réutilisation potentielle pour des

travaux scientifiques ou opérationnels. La dernière version du jeu de données au format sqlite est disponible en ligne sous une Licence *Creative Commons*¹.

2.2. Description des données

Une granularité de deux minutes a été obtenue pour une période de trois mois (de février 2016 à avril 2016 inclus). La granularité spatiale est en moyenne de 10km, les temps de trajet étant fournis pour les liens majeurs. Le jeu de données contient 101 liens. La variable brute utilisée est le temps de trajet effectif, à partir duquel il est possible de construire la vitesse de trajet et la vitesse relative de trajet, définie comme le rapport entre temps de trajet optimal (temps de trajet sans congestion, pris comme le temps minimal sur l'ensemble des pas de temps) et le temps de trajet effectif. La congestion est construite par inversion d'un fonction BPR simple avec exposant 1, i.e. en prenant $c_i = 1 - \frac{t_{i,min}}{t_i}$ avec t_i temps de trajet effectif dans le lien i et $t_{i,min}$ temps de trajet minimal.

3. Méthodes and Résultats

3.1. Visualisation des motifs spatio-temporels de congestion

Notre approche étant entièrement empirique, une bonne connaissance des motifs existants pour les variables de trafic, en particulier de leur variations spatio-temporelles, est crucial pour guider toute analyse quantitative. En s'inspirant de la littérature étudiant la validation empirique de modèles, plus précisément les techniques de *Modélisation orientée-motifs* introduites par Grimm et al. (2005), nous nous intéressons au motifs macroscopiques à des échelles temporelles et spatiales données : d'une manière équivalente aux faits stylisés qui sont dans cette approches extraits d'un système avant de tenter de le modéliser, nous devons explorer les données de manière interactive dans le temps et l'espace afin d'identifier des motifs pertinents et les échelles associées. Une application web interactive a ainsi été implémentée pour explorer les données, à l'aide des packages R shiny et leaflet². Cela permet une visualisation dynamique des motifs de congestion sur l'ensemble du réseau ou dans une zone particulière grâce au zoom. L'application est accessible en ligne à l'adresse <http://shiny.parisgeo.cnrs.fr/transportation>. La Figure 1 présente une capture d'écran de l'interface. La conclusion majeure de l'exploration interactive des données est qu'une grande hétérogénéité spatiale et temporelle est la règle. Le motif temporel le plus récurrent, la périodicité journalière des heures de pointe, est perturbée pour une proportion non négligeable de jours. En première approximation, les heures creuses peuvent être approchées par une distribution localement stationnaire des flots, tandis que les heures de pointe sont trop courtes pour pouvoir impliquer la validation de l'hypothèse d'équilibre. Concernant l'espace, aucun motif spatial particulier n'émerge clairement. Cela signifie que dans le cas d'une validité de l'équilibre utilisateur statique, les méta-paramètres régissant son établissement doivent varier à des échelles temporelles plus courtes qu'un jour. Nous postulons au contraire que le système de trafic est loin de l'équilibre, en particulier pendant les heures de pointe pendant lesquelles des transitions de phase critiques à l'origine des embouteillages émergent.

3.2. Variabilité Spatio-temporelle des Trajets

À la suite de l'exploration interactive des données, nous proposons de quantifier la variabilité spatiale des motifs de congestion pour valider ou invalider l'intuition que si l'équilibre existe par rapport au temps, il est fortement dépendant de l'espace et localisé. La variabilité spatio-temporelle des plus courts chemins de trajet est une première façon d'étudier la stationnarité des flots d'un point de vue de théorie des jeux. En effet, l'Equilibre Utilisateur Statique est la distribution stationnaire des flots sous laquelle aucun utilisateur ne peut augmenter son temps de trajet en changeant son itinéraire. Une forte variabilité spatiale des plus courts chemins sur de courtes échelles spatiales révèle ainsi une non-stationnarité, puisque un même utilisateur prendra un chemin complètement différent après un court laps de temps et ne contribuera plus au même flot que précédemment. Une telle variabilité est en effet observée sur un

¹ à l'adresse http://37.187.242.99/files/public/sytadin_latest.sqlite3

² le code source de l'application et des analyses est disponible sur le dépôt ouvert du projet à <https://github.com/JusteRaimbault/TransportationEquilibrium>

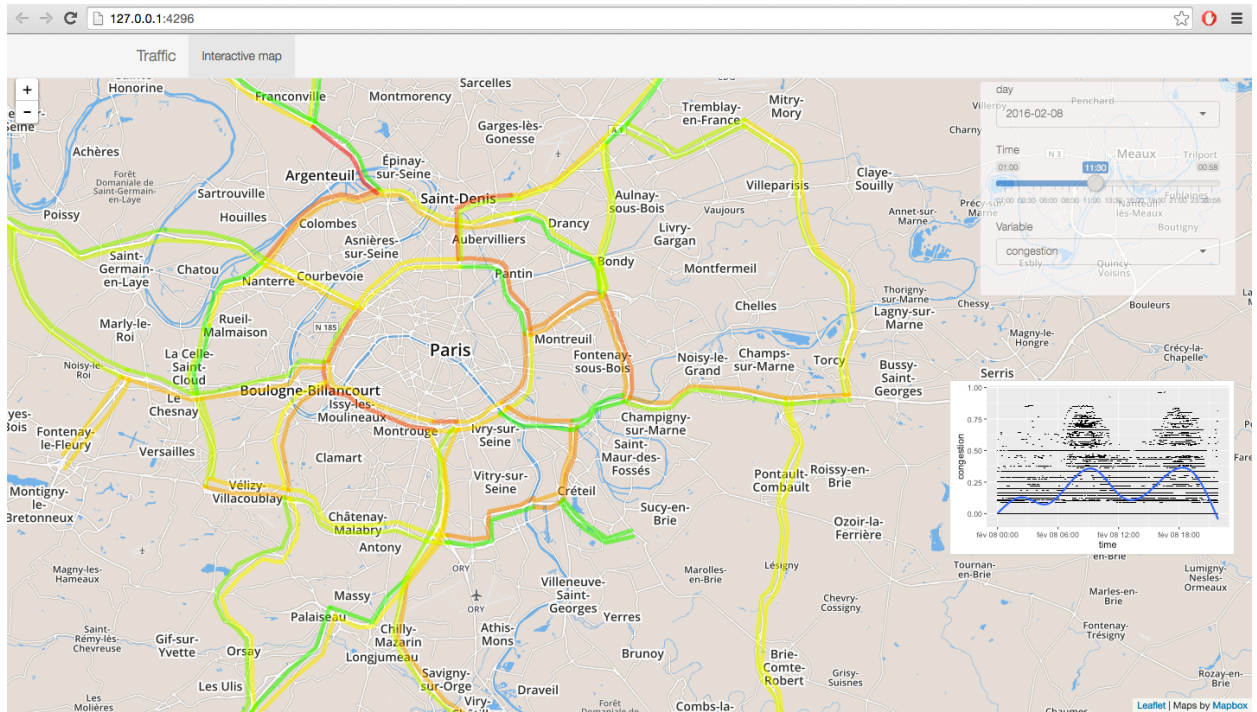


FIGURE 1. Capture de l'application web permettant l'exploration spatio-temporelle des données de trafic pour la région Parisienne. Il est possible de choisir date et heure (précision de 15min sur un mois, réduite par rapport au jeu de données initial pour des raisons de performance). Un graphe résume les motifs de congestion pour la journée courante.

nombre non-négligeable de chemins pour chaque jour du jeu de données. La figure 2 montre un exemple de variation spatiale extrême d'un trajet pour une paire Origine-Destination particulière.

L'exploration systématique de la variabilité du temps de trajet sur l'ensemble du jeu de données, et des distances de trajet associées, confirme, comme présenté en figure, que la variation absolue du temps de trajet présente fréquemment une forte variation de son maximum sur l'ensemble des paires O-D, jusqu'à 25 minutes avec une moyenne temporelle locale autour de 10 minutes. La variabilité spatiale correspondante entraîne des détours allant jusqu'à 35km.

3.3. Stabilité des mesures de réseau

La variabilité des trajectoires potentielles observée dans la section précédente peu être confirmée par l'étude de la variabilité des propriétés du réseau. En particulier, les mesures topologiques de réseau capturent les motifs globaux dans un réseau de transport. Les mesures de centralité et de connectivité des noeuds sont des indicateurs classiques pour la description des réseaux de transport comme rappelé par Bavoux et al. (2005). La littérature en transports a développé des mesures de réseau élaborées et opérationnelles, comme des mesures de robustesse pour identifier les liens critiques et mesurer la résilience globale du réseau aux perturbations (un exemple parmi d'autres est l'indice de *Robustesse du Réseau Effective* introduit dans Sullivan et al. (2010)).

Plus précisément, nous étudions la centralité de chemin du réseau de transport, défini pour un noeud comme le nombre de plus courts chemins passant par celui-ci, i.e. par l'équation

$$b_i = \frac{1}{N(N-1)} \cdot \sum_{o \neq d \in V} \mathbb{1}_{i \in p(o \rightarrow d)} \quad (1)$$

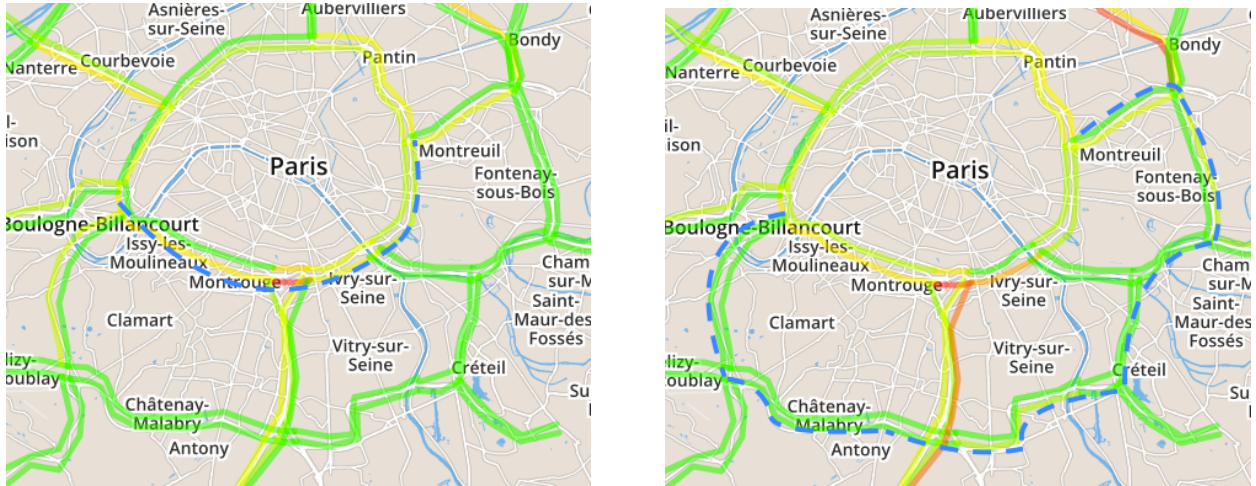


FIGURE 2. Variabilité spatiale d'un plus court chemin en temps de trajet (trajet du plus court chemin en pointillé bleu). Dans un intervalle de seulement 10 minutes, entre le 11/02/2016 00 :06 (à gauche) et le 11/02/2016 00 :16 (à droite), le plus court chemin entre Porte d'Auteuil à l'ouest et Porte de Bagnolet à l'est, augmente en distance effective de $\approx 37\text{km}$ (avec une augmentation du temps de trajet de seulement 6 minutes), à cause d'une forte perturbation sur le périphérique parisien.

où V est l'ensemble des sommets du réseau de taille N , et $p(o \rightarrow d)$ est l'ensemble des noeuds sur le plus court chemin entre les sommets o et d (le plus court chemin étant calculé avec le temps de trajet effectif). Cette mesure de centralité est plus adaptée que d'autre dans notre cas, comme la centralité de proximité qui n'inclut pas la congestion potentielle comme la centralité de chemin.

Nous montrons en Figure 4 la variation relative absolue du maximum de la centralité de chemin, pour la même fenêtre temporelle que les indicateurs empiriques précédents. Plus précisément, elle est définie par

$$\Delta b(t) = \frac{|\max_i(b_i(t + \Delta t)) - \max_i(b_i(t))|}{\max_i(b_i(t))} \quad (2)$$

où Δt est le pas de temps du jeu de données (la plus petite fenêtre temporelle sur laquelle une variabilité peut être capturée). Cette variation relative absolue a une signification directe : une variation de 20% (qui est atteinte un nombre significatif de fois comme montré en Figure 4) implique dans le cas d'une variation négative, qu'au moins cette proportion de trajectoires potentielles ont changé et que la potentielle congestion locale a décré de la même proportion. Dans le cas d'une variation positive, un seul noeud a capturé au moins 20% des trajets. Sous l'hypothèse (qu'on ne tente pas de vérifier ici et qu'on peut également supposer non vérifiée comme montré par Zhu and Levinson (2010), mais que l'on utilise comme un outil pour donnée une intuition sur la signification concrète de la variabilité de la centralité) que les utilisateurs choisissent rationnellement le plus court chemin, et supposant que la majorité des trajets est réalisées, une telle variation de la centralité implique une variation similaire dans les flots effectifs, conduisant à la conclusion qu'ils ne peuvent être stationnaires ni dans le temps (au moins sur une échelle plus grande que Δt) ni dans l'espace.

3.4. Hétérogénéité spatiale de l'équilibre

Afin d'obtenir un point de vue différent sur la variabilité spatiale des motifs de congestion, nous proposons d'utiliser un indice d'auto-corrélation spatiale, l'indice de Moran (défini par exemple dans Tsai (2005)). Utilisé plus généralement en analyse spatiale, avec diverses applications allant de l'étude de la forme urbaine à la quantification de la ségrégation, il peut être appliqué à toute variable spatiale. Il permet d'établir des relations de voisinage et révèle la

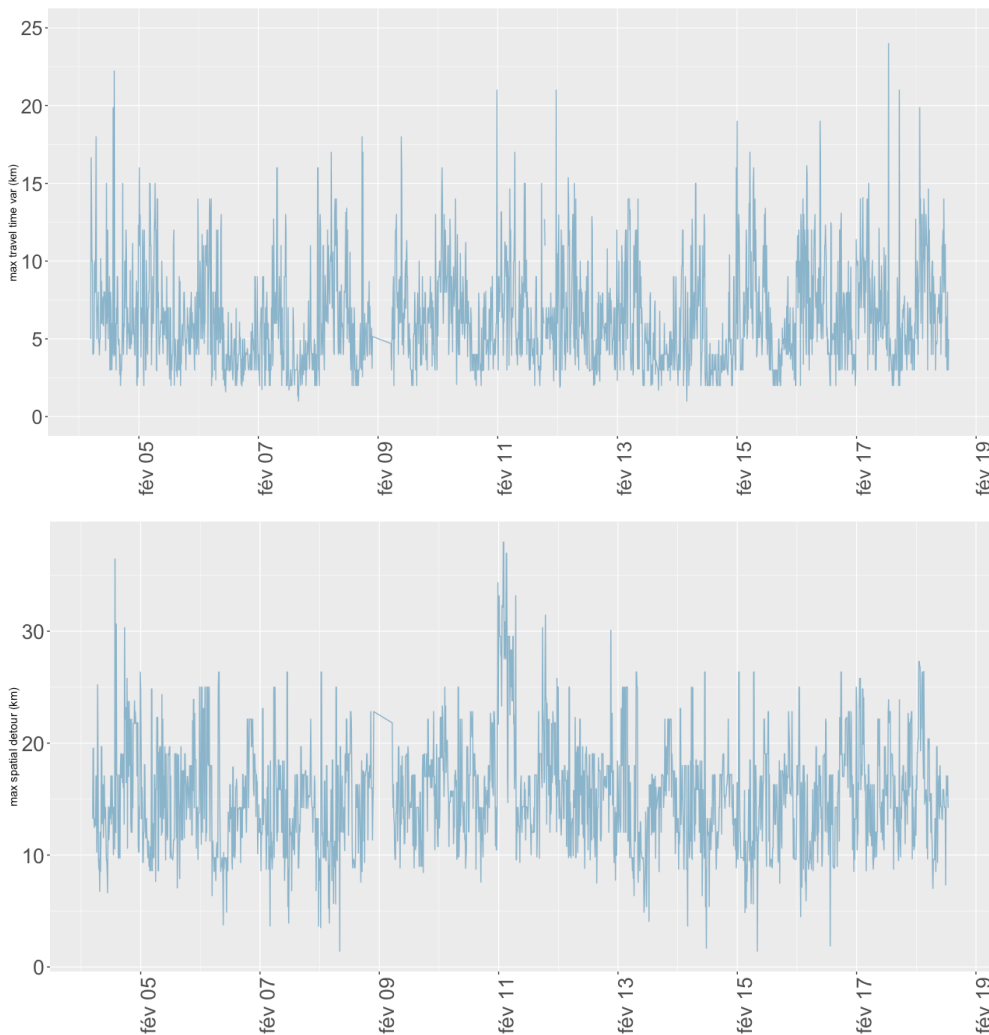


FIGURE 3. Variabilité maximale du temps de trajet (en haut) en minutes et de la distance de trajet correspondante (en bas) pour un échantillon de deux semaines. Le graphe représente le maximum sur l'ensemble des paires Origine-Destination de la variabilité absolue entre deux pas de temps consécutifs. Les heures de pointe induisent une forte variabilité du temps de trajet, allant jusqu'à 25 minutes et une variabilité de distance jusqu'à 35km.

consistance spatiale locale d'un équilibre s'il est appliqué à une variable de trafic localisée. A un point donnée de l'espace, l'auto-corrélation locale pour la variable c est calculée par

$$\rho_i = \frac{1}{K} \cdot \sum_{i \neq j} w_{ij} \cdot (c_i - \bar{c})(c_j - \bar{c}) \quad (3)$$

où K est une constante de normalisation égale à la somme des poids spatiaux fois la variance de la variable et \bar{c} est la moyenne de la variable. Dans notre cas, nous choisissons des poids spatiaux de la forme $w_{ij} = \exp\left(\frac{-d_{ij}}{d_0}\right)$ avec d_0 distance typique de décroissance. L'auto-corrélation est calculée sur la congestion des liens, localisée au centre du lien. Elle capture ainsi les corrélations spatiales dans un rayon du même ordre que la distance de décroissance autour du point i . La moyenne sur l'ensemble des points fournit l'indice d'auto-corrélation spatiale I . Une stationnarité des flots devrait impliquer une stabilité temporelle de l'index.

La figure 5 présente l'évolution temporelle de l'auto-corrélation spatiale pour la congestion. Comme attendu, on observe une forte décroissance de l'auto-corrélation avec la distance de décroissance, à la fois sur l'amplitude et les

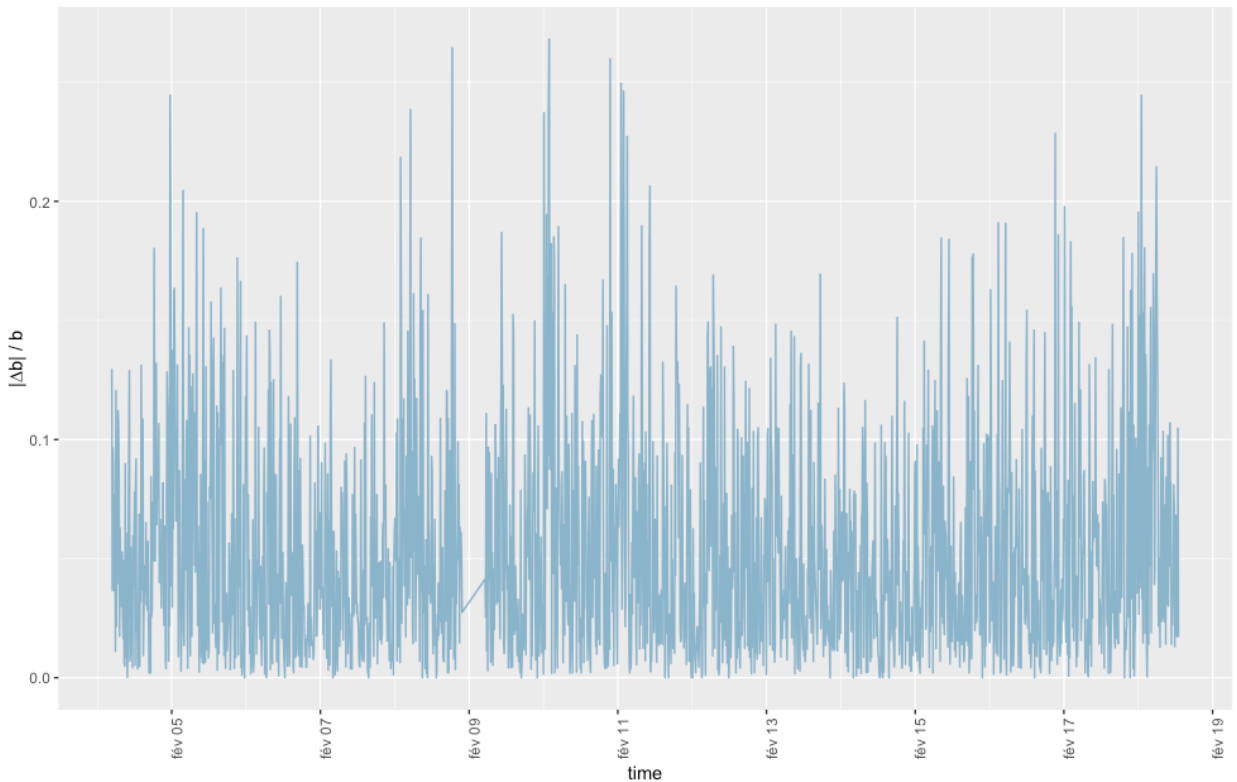


FIGURE 4. Stabilité temporelle du maximum de la centralité de chemin. Le graphe montre dans le temps la dérivée normalisée du maximum de la centralité de chemin, qui capture ses variations relatives à chaque pas de temps. La valeur maximale de 25% correspond à de très fortes perturbations du réseau sur les liens correspondants, puisque cela implique qu'au moins cette proportion d'utilisateurs prenant le lien dans des conditions précédentes doivent prendre un trajet complètement différent.

moyennes temporelles. La forte variabilité temporelle implique de courtes échelles temporelles pour des fenêtres potentielles de stationnarité. Pour une distance de décroissance de 1km, en comparant l'auto-corrélation à la congestion (ajustée à l'échelle du graphe pour lisibilité), on observe que les fortes corrélations coïncident avec les heures creuses, tandis que les heures de pointe correspondent à une décroissance des corrélations. Notre interprétation, combinée avec la variabilité observée des motifs spatiaux, est que les heures de pointe correspondent à un comportement chaotique du système, puisque les bouchons peuvent émerger dans n'importe quel lien du réseau : la corrélation disparaît alors puisque l'espace des phases atteignables pour un système dynamique chaotique est rempli uniformément par les trajectoires, de façon équivalente à des vitesses relatives qui apparaîtraient comme aléatoires et indépendantes.

4. Discussion

4.1. Implications théoriques et pratiques des conclusions empiriques

Nous prétendons que les implications théoriques de ces résultats empiriques n'impliquent pas nécessairement un rejet total du cadre de l'Equilibre Utilisateur Statique, mais révèlent plutôt un besoin de plus fortes connexions entre la littérature théorique et les études empiriques. Si chaque nouveau cadre théorique introduit est généralement testé sur un cas ou plus, il n'existe pas de comparaisons systématiques de chacun sur des jeux de données de grande taille et variés, et pour des objectifs d'application différents (prédiction du trafic, reproduction de faits stylisés, etc.), à l'image des revues systématiques qui sont la règle en évaluation thérapeutique par exemple. Cela implique cependant des pratiques de partage des données et des modèles plus larges que celles existant couramment. La connaissance précise des potentialités d'application d'un cadre donné peut induire des développements inattendus comme l'intégration dans

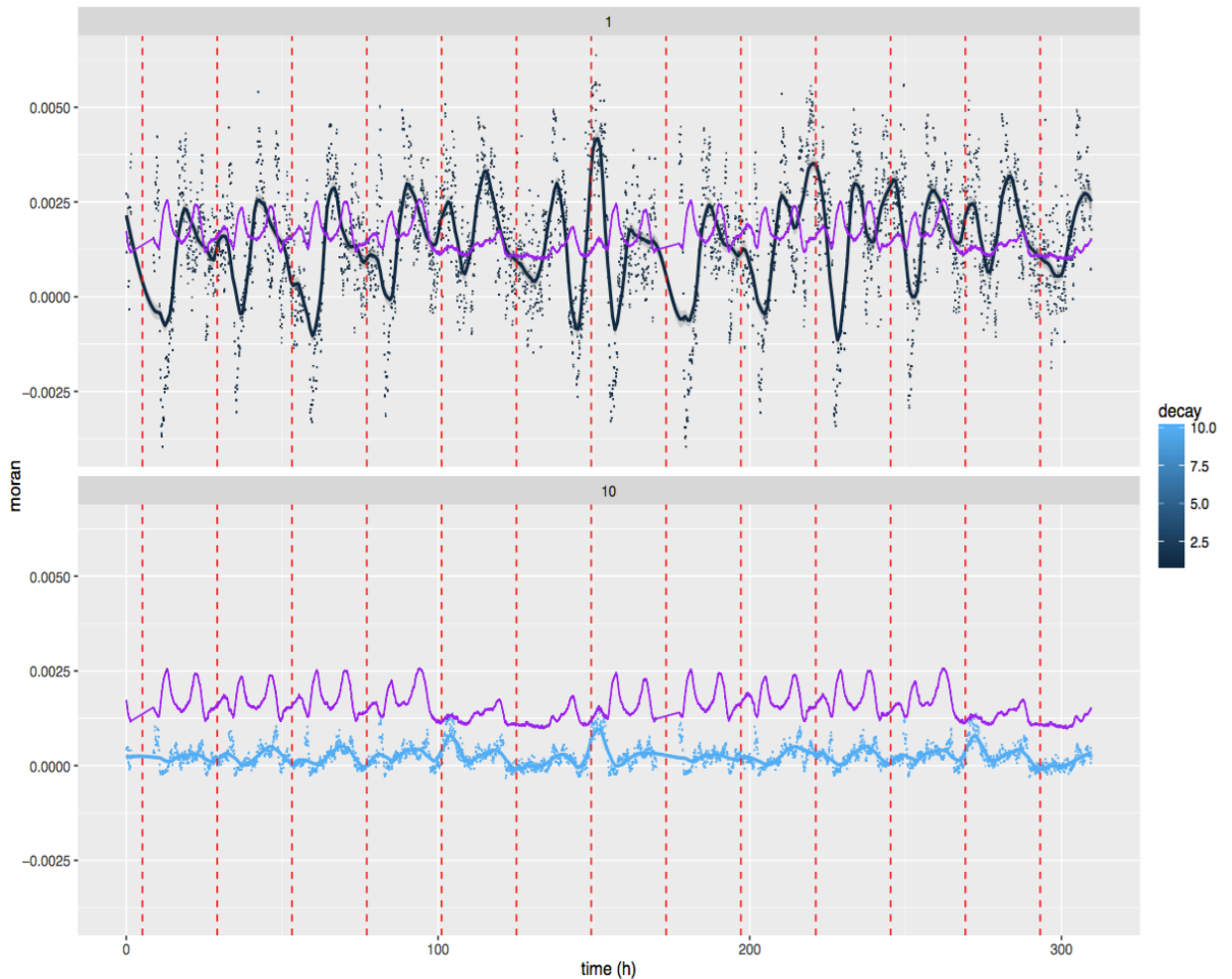


FIGURE 5. Auto-corrélations spatiales pour les vitesses relatives sur deux semaines. Le graphe montre les valeurs de l'auto-corrélation dans le temps, pour des valeurs variables (1,10km) de la distance de décroissance. les valeurs intermédiaires de la distance de décroissance donnent une déformation relativement continue entre ces deux extrêmes. Les points sont lissés sur une fenêtre temporelle de 2h pour faciliter la lecture. Les lignes pointillées verticales correspondent à minuit de chaque jour. La courbe violette donne la vitesse relative, ajustée à l'échelle pour établir la correspondance entre les heures de pointe et les variations de l'auto-corrélation.

des modèles plus larges. L'exemple des études des interaction entre Transport et Usage du Sol (modèles *LUTI*) est une bonne illustration d'un cas où le EUS peut toujours être utilisé avec des motivations plus larges que la modélisation du trafic. Kryvobokov et al. (2013) décrit deux modèles *LUTI*, dont l'un inclut deux équilibres pour les modèles de transport à quatre temps et pour l'évolution de l'usage du sol (localisation des ménages et emplois), l'autre étant dynamique. La conclusion est que chaque modèle a ses avantages au regard de l'objectif poursuivi, et que le modèle statique peut être utilisé pour comparer des politiques sur le temps long, tandis que le modèle dynamique fournit de l'information plus précise à de plus petites échelles temporelles. Dans le premier cas, un module de transport plus compliqué aurait été plus difficile à inclure, ce qui est un avantage du EUS dans ce cas.

Concernant les applications pratiques, il semble naturel que les modèles statiques ne devraient pas être utilisés pour la prédiction et la gestion du trafic sur de petites échelles temporelles (semaine ou jour) et que des efforts doivent être faits pour implémenter des modèles plus réalistes. Cependant, l'utilisation des modèles par la communauté des ingénieurs et des planificateurs n'est pas directement reliée aux enjeux académiques et à l'état de l'art dans le domaine. Dans le cas particulier de la France et des modèles de mobilité, Commenges (2013) a montré que les ingénieurs allaient jusqu'au point de construire des problèmes inexistants et d'implémenter les modèles correspondants qu'ils

avaient importé d'un contexte géographique totalement différent (la planification aux Etats-Unis). L'utilisation d'un cadre ou d'un type de modèle a des raisons historiques qui peuvent être difficiles à surmonter.

4.2. Vers des interprétations explicatives de la non-stationnarité

Une hypothèse qu'on peut formuler concernant l'origine de la non-stationnarité des flots dans le réseau, au regard de l'exploration des données et des analyses quantitatives, est que le réseau est au moins la moitié du temps fortement congestionné et dans un état critique. Les heures creuses sont les plus grandes fenêtres temporelles potentielles de stationnarité spatiale et temporelle, mais couvre moins de la moitié du temps. Comme déjà interprété dans le comportement de l'indicateur d'auto-corrélation, un comportement chaotique pourrait être à l'origine d'une telle variabilité lors des heures congestionnées. A la manière d'un fluide supercritique qui condense sous une perturbation externe infinitésimale, l'état d'un lien peut qualitativement changer par un petit incident, produisant une perturbation du réseau qui se propage et peut même s'amplifier. L'effet direct des événements du trafic (incidents signalés ou accidents) ne peut pas être étudié sans source de données extérieure, et un enrichissement de la base de données dans cette direction pourrait être intéressante. Cela permettrait d'établir la proportion de perturbations qui paraissent avoir un effet direct et quantifier un niveau de caractère critique de la congestion du réseau dans le temps, ou d'étudier plus précisément des phénomènes localisés comme les conséquences d'un incident de trafic sur la voie opposée.

4.3. Développements possibles

Le travail futur pourra être planifié dans la direction d'une étude raffinée de la stabilité temporelle sur des zones du réseau, i.e. l'étude quantitative précise de la non-stationnarité des heures de pointes découverte ci-dessus. Pour cela nous proposons de calculer numériquement la stabilité de Liapounov du système dynamique régissant les flots de trafic, par l'intermédiaire d'algorithmes numériques comme ceux décrits par Goldhirsch et al. (1987). La valeur des exposants de Liapounov fournit l'échelle de temps sur laquelle le système instable s'éloigne de l'équilibre. Leur comparaison avec la durée des heures de pointe et le temps de trajet moyen, sur différentes zones spatiales et différentes échelles, devrait fournir plus d'information sur une possible validité de l'hypothèse de stationnarité locale. Cette technique a déjà été introduite à une autre échelle dans les études de transport, comme e.g. Tordeux and Lassarre (2016) qui étudie la stabilité des modèles de régulation de vitesse à l'échelle microscopique pour éviter l'émergence de congestion.

D'autres directions de recherche peuvent consister en le test des autres hypothèses du EUS (comme le choix rationnel du plus court chemin, qui serait cependant difficile à tester à un tel niveau d'agrégation, impliquant l'utilisation de modèles de simulation calibrés et cross-validés sur le jeu de données pour comparer différentes hypothèses, sans toutefois nécessairement une validation ou invalidation directe de l'hypothèse), ou le calcul empirique des paramètres dans les cadres d'Equilibre Utilisateur Stochastique ou Dynamique.

5. Conclusion

Nous avons décrit une étude empirique ayant pour but une étude simple, mais selon notre point de vue nécessaire, de l'existence de l'équilibre utilisateur statique, plus précisément de sa stationnarité dans le temps et l'espace pour un réseau routier métropolitain principal. Un jeu de données de congestion du trafic est construite par collection de données, pour le réseau du Grand Paris sur 3 mois avec une granularité temporelle de 2 minutes. L'exploration interactive du jeu de données via une application web permettant la visualisation spatio-temporelle aide à guider les analyses quantitatives. La variabilité spatio-temporelle des plus courts chemins et de la topologie du réseau, en particulier la centralité de chemin, révèle que l'hypothèse de stationnarité ne tient généralement pas, ce qui est confirmé par l'étude de l'auto-corrélation spatiale de la congestion du réseau. Nous suggérons que nos résultats soulignent un besoin général de plus grandes connexions entre les études théoriques et empiriques, puisque cette étude permet de chasser les incompréhensions théoriques sur l'Equilibre Utilisateur Statique, et guider le choix d'application potentielles.

Références

- Bavoux, J.J., Beaucire, F., Chapelon, L., Zembri, P., 2005. *Géographie des transports*. Paris.
- Bouteiller, C., Berjoan, S., 2013. Open data en transport urbain : quelles sont les données mises à disposition ? quelles sont les stratégies des autorités organisatrices ? .
- Commenges, H., 2013. The invention of daily mobility : Performative aspects of the instruments of economics of transportation. Theses, Université Paris-Diderot-Paris VII .
- Goldhirsch, I., Sulem, P.L., Orszag, S.A., 1987. Stability and lyapunov stability of dynamical systems : A differential approach and a numerical method. *Physica D : Nonlinear Phenomena* 27, 311–337.
- Grimm, V., Revilla, E., Berger, U., Jeltsch, F., Mooij, W.M., Railsback, S.F., Thulke, H.H., Weiner, J., Wiegand, T., DeAngelis, D.L., 2005. Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems : lessons from ecology. *science* 310, 987–991.
- Guo, X., Liu, H.X., 2011. Bounded rationality and irreversible network change. *Transportation Research Part B : Methodological* 45, 1606–1618.
- Han, S., 2003. Dynamic traffic modelling and dynamic stochastic user equilibrium assignment for general road networks. *Transportation Research Part B : Methodological* 37, 225–249.
- Kryvobokov, M., Chesneau, J.B., Bonnafous, A., Delons, J., Piron, V., 2013. Comparison of static and dynamic land use-transport interaction models : Pirandello and urbansim applications. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* , 49–58.
- Leurent, F., Boujnah, H., 2014. A user equilibrium, traffic assignment model of network route and parking lot choice, with search circuits and cruising flows. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 47, 28–46.
- Mahmassani, H.S., Chang, G.L., 1987. On boundedly rational user equilibrium in transportation systems. *Transportation science* 21, 89–99.
- Puzis, R., Altshuler, Y., Elovici, Y., Bekhor, S., Shifan, Y., Pentland, A., 2013. Augmented betweenness centrality for environmentally aware traffic monitoring in transportation networks. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 17, 91–105.
- Rasmussen, T.K., Watling, D.P., Prato, C.G., Nielsen, O.A., 2015. Stochastic user equilibrium with equilibrated choice sets : Part ii—solving the restricted sue for the logit family. *Transportation Research Part B : Methodological* 77, 146–165.
- Sullivan, J., Novak, D., Aultman-Hall, L., Scott, D.M., 2010. Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links : a link-based capacity-reduction approach. *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 44, 323–336.
- Tordeux, A., Lassarre, S., 2016. Jam avoidance with autonomous systems. arXiv preprint arXiv :1601.07713 .
- Tsai, Y.H., 2005. Quantifying urban form : compactness versus ‘ sprawl’ . *Urban studies* 42, 141–161.
- Wardrop, J.G., 1952. Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the institution of civil engineers* 1, 325–362.
- Zhang, K., Mahmassani, H.S., Lu, C.C., 2013. Dynamic pricing, heterogeneous users and perception error : Probit-based bi-criterion dynamic stochastic user equilibrium assignment. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 27, 189–204.
- Zhu, S., Levinson, D., 2010. Do people use the shortest path ? an empirical test of wardrop’s first principle, in : 91th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, Citeseer.