

Estimer la capacité des réseaux urbains à l'aide des modèles macroscopiques

Le présent aide-mémoire montre comment modéliser et estimer la capacité multimodale d'un réseau routier urbain à l'aide d'une approche macroscopique. Cette approche se base sur le diagramme fondamental macroscopique (macroscopic fundamental diagram, MFD) pour caractériser le trafic en ville. Les informations, les recommandations et les méthodes présentées ici sont tirées du projet « NetCap » de la SVI.

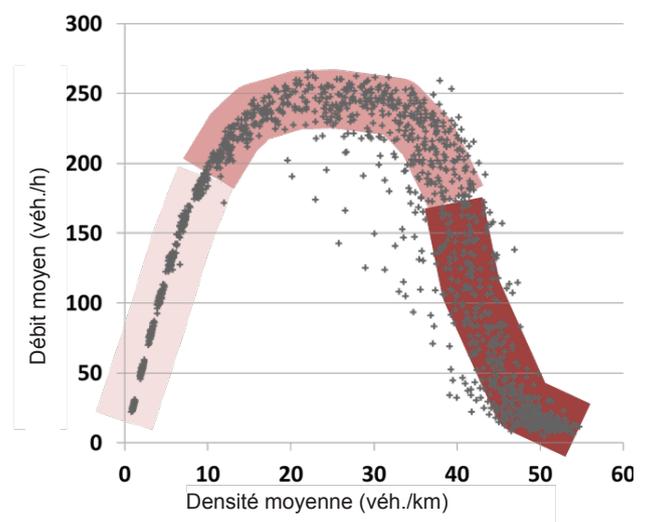
Pour le lecteur pressé

En quoi consiste l'approche macroscopique de l'estimation de la capacité ?

- Les variables classiques du trafic que sont le débit et la densité étaient jusqu'alors relevées sur quelques routes du réseau.
- Les dernières avancées de la recherche montrent que ces variables peuvent désormais être agrégées à une échelle beaucoup plus vaste, permettant ainsi d'obtenir une représentation macroscopique du trafic.
- Le diagramme fondamental macroscopique (MFD) établit la relation entre la densité moyenne et le débit moyen (pondérés par la longueur des tronçons, cf. fig. 1).
- Le MFD est indépendant des relations origine-destination et dépend surtout de la topologie du réseau routier. Grâce à sa forme clairement définie (cf. fig. 1), le MFD met en relation la densité et le débit indépendamment du temps, contrairement à d'autres approches macroscopiques (modèle global des transports [MGT], etc.). Il permet ainsi de différencier les trois états d'un trafic : libre, synchronisé ou congestionné.
- Le MFD permet de déterminer la capacité globale d'un réseau urbain de manière relativement aisée.
- A l'aide du MFD, il est possible d'améliorer les stratégies de gestion du trafic, nouvelles ou actuelles, et d'évaluer leur efficacité.

- Cette approche macroscopique permet également de quantifier et de modéliser les interactions entre le trafic individuel et les transports collectifs.
- L'extension du MFD à 3 dimensions, le 3D-MFD, indique comment répartir l'espace à disposition entre les différents modes de transport de manière à maximiser l'écoulement des flux.

MFD du centre-ville de Zurich



Source: rapport NetCap

Fig. 1 : Diagramme fondamental macroscopique (MFD) du centre-ville de Zurich représentant les trois états du trafic : le rose clair représente le trafic libre, le rose le trafic synchronisé (capacité) et le rouge le trafic congestionné.

Impressum

Editeur : SVI Association suisse des ingénieurs et experts en transports www.svi.ch

Auteurs : Lukas Ambühl, Javier Ortigosa, Monica Menendez, IVT ETH

Traduction : Agnès Camacho-Hübner, IntenCity Sàrl et Aline Renard, Transitec Ingénieurs-Conseils SA

Autorisation

Cet aide-mémoire a été approuvé le 19.09.2018 par le comité de la SVI et autorisé à publication.

Sous réserve de mention de la source, il est autorisé de reproduire tout ou partie de l'aide-mémoire dans d'autres documents (dossiers, rapports, etc.)

1 Qu'est-ce qu'un diagramme fondamental macroscopique (MFD) ?

Le diagramme fondamental classique d'une rue donnée met en relation les variables que sont le débit (véh/h) et la densité (véh/km) du trafic. Il permet de constater que le débit augmente proportionnellement à la densité jusqu'à ce que cette dernière atteigne un seuil critique au-delà duquel le débit diminue avec l'augmentation de la densité (cf. fig. 2). Au final, le diagramme fondamental a plus ou moins la forme d'un triangle. La valeur de débit maximale peut ainsi être considérée comme la capacité d'une rue. De plus, la pente de la courbe, qui relie l'origine à un état donné du trafic, correspond à la vitesse du trafic

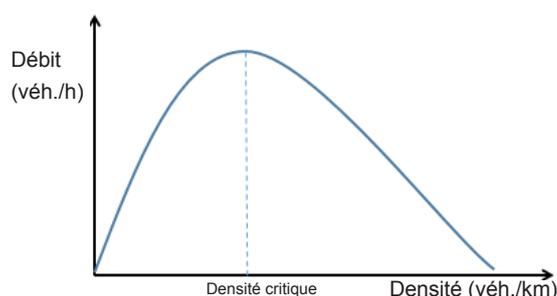


Fig. 2 : Diagramme fondamental : le débit et la densité du trafic augmentent proportionnellement jusqu'à atteindre le seuil de densité critique au-delà duquel le débit diminue avec l'augmentation de la densité.

La réflexion est la même en ce qui concerne une agglomération. Lorsque plusieurs rues sont regroupées dans une même zone et que l'on connaît leurs densités et leurs débits moyens, il est possible d'obtenir un diagramme fondamental macroscopique (MFD). De même que pour le diagramme fondamental, il représente les trois états d'un trafic : libre, synchronisé ou congestionné. La figure 1 montre l'exemple d'un MFD pour la ville de Zurich (cf. aussi fig. 4). La partie rose clair représente le trafic libre. La performance du système augmente de manière linéaire avec le nombre de véhicules circulant sur le réseau. Dans la partie rose, le réseau arrive à saturation (trafic synchronisé). Ce débit de trafic maximum représente la capacité. La densité critique est la densité de véhicules à laquelle la capacité maximale est atteinte. Connaître la densité critique est essentiel, car, pour être efficace, une stratégie de gestion du trafic doit avoir pour objectif de maintenir le système de transport autant que possible en deçà de ce seuil. Si le nombre de véhicules circulant à l'intérieur du réseau augmente malgré tout, des embouteillages s'ensuivent, qui se généralisent par la suite. Les véhicules doivent alors ralentir, voire s'arrêter complètement – le débit de trafic diminue et se rapproche de zéro. La performance du système chute, comme illustré par la partie rouge du diagramme.

Initialement, le MFD a été développé pour des réseaux routiers monomodaux. Dans les faits, un nombre crois-

sant d'utilisateurs utilise plusieurs modes pour se déplacer. Depuis, le MFD a pu être étendu de manière multidimensionnelle à d'autres modes de transport : ces 3D-MFD permettent ainsi d'avoir une vision globale de la dynamique existant entre les transports collectifs (TC) et le trafic individuel motorisé (TIM). Le 3D-MFD renseigne sur la manière dont les différents modes de transport influencent la capacité globale du système de transport.

A l'aide du 3D-MFD, les autorités sont en mesure de comprendre et de quantifier le conflit d'objectifs entre différentes variantes d'exploitation du réseau routier. Le 3D-MFD facilite en outre la répartition de l'espace entre les différents modes de transport en fonction des flux d'utilisateurs. Pour plus d'informations au sujet du 3D-MFD se référer au point 6.

2 Quels sont les avantages du MFD ?

L'avantage du MFD est qu'il permet de connaître de manière relativement aisée l'état de saturation du trafic au sein d'une zone donnée. Autre particularité importante du MFD : il est indépendant des relations origine-destination à l'intérieur d'un réseau. En d'autres termes, le MFD dépend principalement des caractéristiques du réseau (longueur moyenne des rues, régulation lumineuse, etc.). Cela signifie qu'une fois le MFD d'une ville obtenu, il ne variera pratiquement pas, même sur de longues périodes. Le fait qu'il garde toujours la même forme facilite la détermination de l'état du trafic.

Connaître la capacité globale du réseau routier d'une ville et être capable d'évaluer l'état du trafic en temps réel offrent divers autres avantages :

Le MFD permet d'étudier l'influence des caractéristiques du réseau et de la gestion du trafic sur le système dans son ensemble.

Il devient alors possible d'évaluer et de développer les mesures et les stratégies nécessaires, et les décisions correspondantes s'en trouvent facilitées.

A l'aide du MFD, les informations sur l'état du réseau obtenues en temps réel peuvent être directement utilisées pour la gestion du trafic.

Le MFD peut être obtenu en étudiant les paramètres que sont le débit et la densité du trafic (relevés à l'aide de boucles de détection, par ex.). La relation observée permet d'évaluer les conditions de circulation dans une ville à un instant précis grâce aux mesures du débit et de la densité du trafic effectuées en différents endroits. Des contrôles d'accès peuvent alors être mis en place ou améliorés dans le but d'éviter que le système ne dépasse le seuil de densité critique, et ainsi prévenir la formation d'embouteillages. Le MFD améliore la mise en œuvre d'un concept d'accessibilité. Malgré tout ce potentiel, l'utilisation des MFD en situation réelle est restée jusqu'ici plutôt limitée.

3 Comment obtient-on un MFD ?

Les points suivants traitent plus particulièrement de l'utilisation du MFD pour l'analyse du trafic individuel motorisé (TIM). Le 3D-MFD qui intègre d'autres modes de transports sera évoqué au point 6.

Le MFD peut être obtenu à l'aide de technologies et d'appareils déjà existants et/ou implémentés. Des intervalles de cinq minutes sont habituellement utilisés pour les relevés (pour plus de détails, voir le point 4). Les moyennes du débit et de la densité du trafic, pondérées par la longueur des tronçons concernés, sont calculées pour une zone donnée. Ainsi, plus un tronçon est long, plus son poids sera élevé. Etant donné que le MFD complet représente tous les états du trafic d'un système (libre, synchronisé et congestionné), les moyennes en question doivent être relevées sur une période suffisamment longue pour assurer qu'ils soient bien tous pris en compte.

De plus amples informations (y compris les formules et les conditions aux limites) se trouvent dans le rapport de recherche de la SVI.

Comme indiqué précédemment, le MFD est indépendant de la structure de la demande (relations origine-destination). Il est recommandé d'effectuer les relevés sur différents jours et à différentes heures.

4 Un MFD basé sur des données empiriques ?

Afin de disposer de données empiriques pour le MFD d'une ville ou d'une agglomération, un nombre relativement élevé de détecteurs permettant d'obtenir des informations sur le débit et la densité du trafic doivent être répartis dans la zone d'étude. Les relevés doivent être effectués à de courts intervalles de temps (5 min). Les données peuvent être recueillies à l'aide de boucles de détection, de radars, de caméras ou autres (Bluetooth, etc.). La figure 3 en haut montre la relation débit-densité de deux rues de Yokohama (Japon). Après agrégation de la totalité des détecteurs de la ville, on obtient la figure 3 en bas, qui montre le MFD pour toute la ville : le regroupement de tous les détecteurs a pour résultat la disparition de la dispersion visible sur la figure 3 en haut. La prudence est toutefois de mise lors du choix du détecteur : il est en effet possible que certains détecteurs surestiment localement la densité du trafic peu avant les feux de circulation à cause des files d'attente récurrentes.

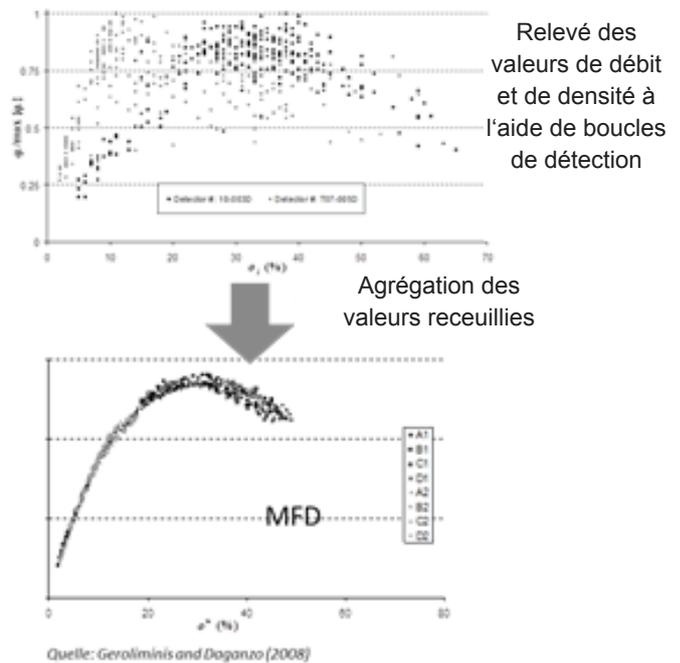


Fig. 3 : MFD obtenu pour la ville de Yokohama (Japon). En haut : relation débit-densité fournie par deux détecteurs à boucle. En bas : MFD obtenu à partir de l'agrégation de tous les détecteurs de la ville.

Toutes les routes d'un réseau routier ne sont pas équipées de détecteurs. Il est toutefois possible d'interpoler les données du MFD : avec une couverture de 25% des routes choisies au hasard dans une zone, il est déjà possible d'obtenir des écarts inférieurs à 15% par rapport au MFD réel. Une couverture correspondant à cet ordre de grandeur n'est en effet pas rare dans les villes suisses. Cela prouve qu'il est possible d'obtenir un MFD relativement précis même lorsque la couverture est peu élevée. Dans le cas où l'on dispose déjà d'informations routières (issues d'un système de surveillance ou d'un modèle de simulation existants), il devient possible de sélectionner une combinaison optimale de tronçons permettant d'obtenir des MFD représentatifs malgré un faible nombre de détecteurs. Il a par exemple été montré lors d'une simulation ayant pour objet le centre-ville de Zurich qu'avec seulement 5% des routes équipées, il était possible d'arriver à un taux d'erreur inférieur à 5%. Un bon point de départ consiste à se concentrer sur les axes fortement chargés. Afin de garantir un apport permanent de nouvelles informations au MFD, il faut veiller à ce que les débits de trafic respectifs des axes sélectionnés ne soient pas trop corrélés entre eux.

5 Un MFD basé sur des données de simulation ?

Il est également possible d'obtenir un MFD à partir de simulations de trafic. Les calculs sont similaires à ceux décrits aux points 3 et 4. La figure 1 représente un MFD obtenu à partir de la simulation calibrée du centre-ville de Zurich (cf. aussi fig. 4). La simulation permet d'étudier l'effet de différents paramètres, qui seraient difficilement testables dans la réalité, sur la forme du MFD. Les modifications ultérieures du réseau peuvent également être entrées dans le modèle de simulation, ce qui permet d'analyser leurs impacts sur la capacité. Les modèles de microsimulation sont les mieux adaptés pour cela, car ils fournissent des informations dynamiques précises sur la situation du trafic et les comportements des usagers en matière de déplacements.

La plupart des MFD obtenus à l'aide de simulations sont basés sur des microsimulations qui utilisent des itinéraires fixes déterminés à l'aide de méthodes statiques d'affectation du trafic. Cette approche ne requiert que peu de puissance de calcul, les microsimulations n'ayant besoin d'être exécutées qu'une seule fois, et s'avère en outre comparativement stable, étant donné que les itinéraires ne changent pas. Elle présente toutefois deux inconvénients majeurs : premièrement, les itinéraires doivent préalablement être calculés à l'aide d'un logiciel ad hoc ; deuxièmement, le trafic n'évolue pas de manière dynamique lors de la formation d'embouteillages (par ex. en cas de nouvelles infrastructures).

Pour les villes qui possèdent déjà un modèle statique d'affectation du trafic (VISUM, TransCAD, etc.) calculant les itinéraires fixes, cette option s'avère peu coûteuse et commode. La plupart des programmes de microsimulation sont en effet capables d'importer ces itinéraires. La microsimulation doit ensuite être calibrée. Certains produits (de microsimulation) admettent que le conducteur modifie son itinéraire en cours de simulation. Cette option d'affectation dynamique du trafic permet d'effectuer plusieurs itérations au cours desquelles le conducteur a la possibilité de modifier son itinéraire à chaque cycle. Le résultat final y gagne en précision et montre comment les conducteurs s'adaptent en cas d'embouteillage. Cette option nécessite cependant une puissance de calcul nettement supérieure.

Dans le cadre du projet NetCap, l'association de microsimulations de trafic (VISSIM) et de simulations multi-agents de la demande (MATSim) est présentée comme solution possible, et encore plus détaillée. La simulation effectuée à l'aide de MATSim permet de définir le comportement de chaque personne individuellement (choix de l'itinéraire, de l'heure, du lieu et du mode de transport) et de la faire évoluer en fonction des conditions. La demande ainsi ajustée peut ensuite être transférée dans VISSIM pour la simulation. Ces deux approches combinées permettent d'obtenir une

microsimulation de trafic ménageant les ressources pour différentes situations du trafic (à l'aide de VISSIM) avec, en plus, une demande ayant été affinée (à l'aide de MATSim).

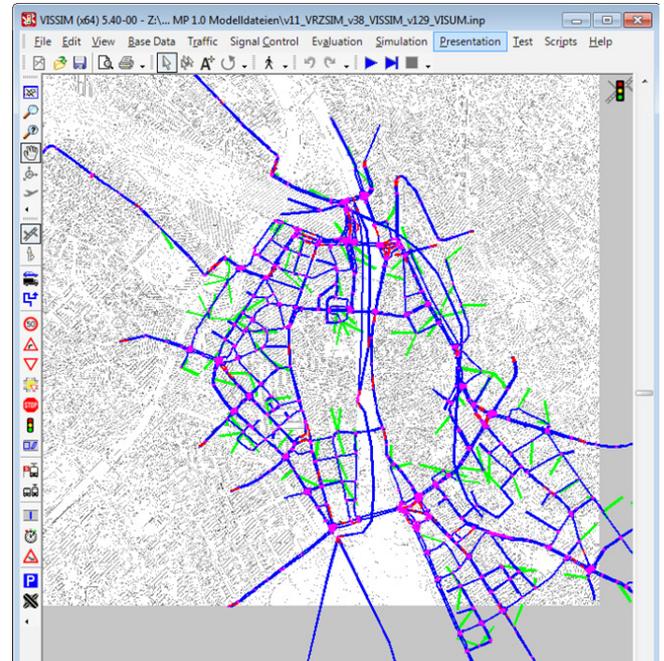


Fig. 4 : extrait de la simulation du centre-ville de Zurich (VISSIM).

6 Qu'est-ce qu'un 3D-MFD et comment l'obtient-on ?

Le 3D-MFD est une extension du MFD. Il tient compte, dans une troisième dimension, des transports collectifs (bus et trams) en plus du TIM, et montre l'influence des différents modes sur la dynamique et la capacité du réseau routier. Les connaissances ainsi acquises permettent d'étudier diverses stratégies (priorisation des bus, répartition de l'espace, etc.) et, en particulier, de les quantifier. Il devient alors plus facile de se prononcer au sujet de la performance globale des transports d'une ville. La forme du 3D-MFD dépend notamment de la répartition de l'espace routier entre TIM et TC.

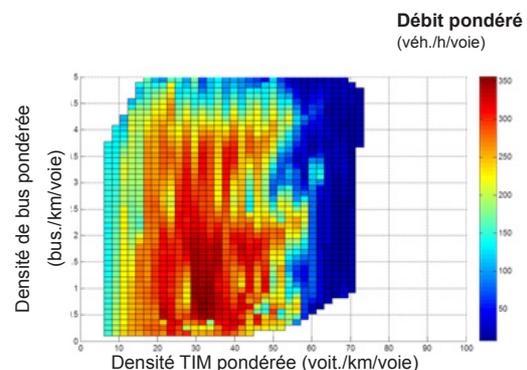


Fig. 5 : Graphique de contour du 3D-MFD de la ville de Zurich. Le débit de véhicules peut être maximisé pour des densités de bus et du TIM données : la couleur indique le nombre de véhicules par kilomètre de voie. Le débit maximum est atteint avec une densité de bus relativement faible.

De même que pour le MFD monomodal, le 3D-MFD peut être obtenu à partir de données empiriques ou de simulations de trafic, mais, dans ce cas, les données doivent être recueillies séparément par mode de transport (TIM, TC). La difficulté d'obtenir un 3D-MFD réside dans le fait qu'il faut relever un grand nombre d'états différents du réseau. Le nombre de points nécessaires se trouve en effet multiplié par la dimension supplémentaire que représentent les TC. Lorsque des horaires cadencés sont utilisés, la difficulté augmente, car la variation des TC nécessaire à une large couverture des densités devient alors difficile à atteindre.

7 Qu'est-ce qu'un 3D-pMFD et comment l'obtient-on ?

On appelle 3D-pMFD le MFD tridimensionnel obtenu lorsque les flux de véhicules sont remplacés par des flux de passagers. Il est normal que la forme du 3D-pMFD, qui représente la capacité en nombre de personnes du système, se différencie nettement de celle d'un 3D-MFD simple, qui représente uniquement la capacité en nombre de véhicules de ce même système. Lorsque la capacité en nombre de personnes (potentielle) du système est connue, le 3D-pMFD permet de quantifier divers scénarios, par exemple la manière dont une modification de la répartition modale ou de la fréquence des TC influence le trafic dans son ensemble. L'information ainsi obtenue permet ensuite aux planificateurs et aux décideurs de quantifier les interactions entre les TC et le TIM de manière plus précise, de développer de nouvelles stratégies de mobilité ou encore d'optimiser la répartition de l'espace.

Etant donné qu'il est plus difficile d'estimer et de recenser le nombre de personnes que le nombre de véhicules, il est par conséquent également plus difficile d'obtenir des données pour le 3D-pMFD. Le plus simple est d'estimer un taux d'occupation moyen pour les voitures et les bus à partir de données historiques. Il faudra toutefois veiller à ce que ces taux reproduisent les variations observées au cours de la journée. L'idéal reste cependant de recueillir les informations sur la fréquentation des TC en temps réel, mais il s'agit d'un procédé sensiblement plus compliqué et plus contraignant.

La figure 6 représente le 3D-pMFD du centre-ville de Zurich. Il est possible d'y identifier des zones à l'intérieur desquelles le flux de passagers de l'ensemble du réseau est maximisé. Ce graphique est issu de la simulation calibrée de la ville de Zurich. De plus amples informations se trouvent dans le rapport, qui contient également un 3D-pMFD incluant les interactions avec les piétons.

8 Conclusion

Même si la recherche n'en est encore qu'à ses débuts sur le sujet, le (3D-)MFD représente une méthode élégante et polyvalente d'évaluation macroscopique de la situation d'un réseau routier. Les approches présentées ici ont un grand potentiel pour quantifier efficacement la capacité globale d'un réseau routier, en faire un monitoring et le gérer. Elles permettent également d'analyser divers scénarios d'évolution de l'offre ou de la demande et ainsi de fournir des bases de discussion et de décision.

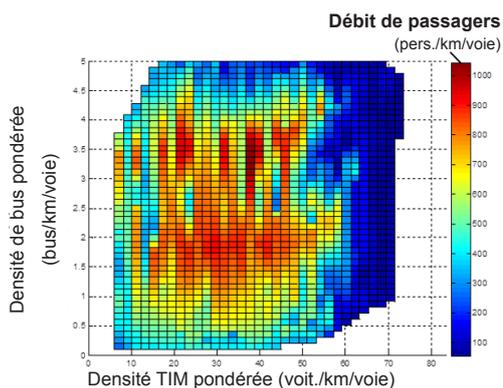


Fig. 6 : Graphique de contour du 3D-MFD de la ville de Zurich. Le débit de passagers peut être maximisé pour des densités de bus et du TIM données : la couleur indique le nombre de passagers par kilomètre de voie ; le maximum se situe ici autour de 40 voitures et 3,5 bus par kilomètre de voie.

Références

NetCap: Intermodale Strecken- /Linien- und Netzleistungsfähigkeit (SVI 2004/032, Nr. 1563)
www.mobilityplatform.ch

ETH Zurich, IVT :
Monica Menendez, Javier Ortigosa, Lukas Ambühl,
Kay W. Axhausen, Francesco Ciari, Patrick Bösch
EPF Lausanne, Urban Transport Systems Laboratory :
Nikolas Geroliminis, Nan Zheng