

Les contraintes de capacité dans les trafics de voyageurs et de véhicules en transport collectif : un modèle de simulation et son application au Grand Paris

Ektoras Chandakas, Fabien Leurent⁽¹⁾ et Alexis Poulhès

Université Paris Est, Laboratoire Ville Mobilité Transport, Ecole des Ponts ParisTech

Résumé

En transport collectif (TC), la capacité de trafic d'une ligne est imposée par la fréquence de service et la contenance de chaque véhicule. Le rapport entre la charge de trafic et la capacité détermine le confort, la fluidité et la rapidité du service rendu. Pour simuler ces phénomènes en cohérence avec les choix d'itinéraire des usagers, le modèle CapTA affecte les trafics des voyageurs aux itinéraires sur un réseau de TC soumis aux contraintes de capacité suivantes : à l'intérieur du véhicule, dans les mouvements de montée-descente, ainsi que dans l'occupation de la voie – ce qui est susceptible de rationner la fréquence de service sur une ligne donnée. L'article présente les principes de ce modèle ainsi qu'une application aux TC franciliens.

Mots-clefs

Transport collectif ; réseau urbain ; Affectation du trafic ; Contraintes de capacité ; Agglomération parisienne

1. Introduction

Contexte. La planification d'un réseau de TC engage un ensemble de dispositions : un plan d'ensemble des lignes, pour un ou plusieurs sous-modes, avec des conditions de correspondance et de tarification ; ainsi que, par ligne, un mode et une ou plusieurs missions de service, et par mission, un type de véhicule donc des capacités intérieures en places assises et debout, des capacités d'échange (nombre et largeur des portes), un itinéraire de parcours, un plan des stations à desservir, un planning des courses ou une fréquence de mission, ce par période.

L'agencement de tous ces aspects détermine la qualité de service par trajet entre deux stations de chaque mission, et plus largement par déplacement d'utilisateur entre ses points d'origine et de destination. A son tour, la qualité de service détermine la clientèle. Réciproquement, la clientèle charge en trafic les véhicules et les missions, et le rapport entre la charge et la capacité de trafic joue sur la qualité de service en termes de temps et/ou d'inconfort. De plus, l'ensemble des dispositions prises dans la planification, induit un coût d'exploitation, à rapporter aux recettes commerciales et à l'utilité collective de l'usage des réseaux.

Par cette description rapide, nous avons rappelé la complexité d'un système de TC. Pour concevoir une offre performante en termes autant de qualité de service que d'économie de moyens, il est bon d'utiliser un modèle de simulation : l'outil approprié est un modèle d'affectation du trafic aux itinéraires sur un réseau. Encore faut-il s'assurer que le modèle

¹ Auteur correspondant: fabien.leurent@enpc.fr. Ecole des Ponts ParisTech, Laboratoire Ville Mobilité Transport, 6-8 avenue Blaise Pascal, Champs sur Marne 77455 Marne la Vallée Cedex

représente, « capture », les phénomènes à l'œuvre dans le fonctionnement concret du système : en particulier les contraintes de capacité et leur influence sur la qualité de service, en interaction avec les choix d'itinéraire des usagers.

Objectif. Au Congrès ATEC de 2010, l'un de nous a présenté une analyse systémique d'un réseau de TC afin d'y relever les phénomènes de capacité et d'ébaucher une modélisation technico-économique d'ingénieur (Leurent, 2010). Nous avons depuis développé un modèle de simulation, avec un logiciel d'application et une application de démonstration au réseau de l'agglomération parisienne : les principes du modèle ont été décrits dans plusieurs communications en conférence internationale (Cf. références). Le présent article a pour but de synthétiser les principes et d'offrir une visite guidée des résultats applicatifs originaux.

Contribution. En bref, le modèle d'affectation du trafic sur un réseau est un modèle d'interaction entre une demande de déplacement et une offre de transport :

- la demande de déplacement est composée d'un ensemble de voyageurs individuels, décrits par flux entre zones d'origine et de destination pendant la période étudiée. Chaque voyageur est réputé choisir un itinéraire optimal pour lui-même, selon un critère de temps généralisé qui agrège le tarif divisé par la valeur unitaire du temps, au temps physique multiplié par un facteur de pénibilité.
- L'offre de transport est composée d'un ensemble de missions de service, chacune avec son tracé, un véhicule type et une fréquence des courses durant la période.
- Les contraintes de capacité concernent la capacité en places assises par véhicule ; la contenance interne d'un véhicule ; les échanges entre véhicule et quai ; l'occupation de la voie par les véhicules.
- Les phénomènes de congestion associés à ces contraintes concernent l'encombrement à bord, qui rend plus pénible le temps passé en véhicule ; l'attente à quai éventuellement prolongée faute de pouvoir embarquer dans un véhicule saturé ; l'allongement du temps de stationnement d'un véhicule sous l'effet des flux en descente et en montée, donc l'allongement du temps de trajet, ainsi le cas échéant qu'une réduction de la fréquence de service, ce qui accroît encore le temps d'attente en station du voyageur et de plus retarde les véhicules en amont.

Les résultats du modèle intègrent ce grand jeu des volumes et des temps, avec à la clef des effets peu intuitifs de prime abord : du côté de l'exploitation, une fréquence nominale excessive peut détériorer les performances ; du côté des usagers, la congestion peut rendre plus avantageux un embarquement à une ou plusieurs stations en amont de celle qui serait préférée en l'absence de charge !

Structure. La suite de l'article est organisée en deux parties : d'une part la description des principes du modèle, d'autre part l'application de démonstration au réseau de TC de l'agglomération parisienne.

2. Le modèle CapTA : caractéristiques essentielles

2.1 La modélisation de l'offre et de la demande

Dans un modèle d'affectation du trafic aux itinéraires sur un réseau, on représente d'une part l'offre de transport i.e. le réseau d'infrastructures et de services, et d'autre part la demande de déplacement, dans sa structure spatiale (les volumes demandés de zone d'origine à zone de

destination) et selon ses comportements économiques de choix d'itinéraire. Le modèle établit conjointement :

- (i) la qualité de service par itinéraire : le confort en véhicule et à quai, la fluidité du parcours et la rapidité de porte à porte.
- (ii) par déplacement d'un individu depuis son origine jusqu'à sa destination, le choix d'un itinéraire (et de sous-mode) repose sur l'axiome de rationalité individuelle : l'usager choisit l'itinéraire le moins coûteux pour lui, en temps généralisé.
- (iii) La charge de trafic par élément d'offre (véhicule en un lieu, section de route...), par superposition des itinéraires des individus.
- (iv) Les effets de la charge de trafic sur le fonctionnement de l'offre : temps passé par tronçon, degré d'encombrement dans un véhicule ou sur un quai, fréquence servie effectivement... toutes caractéristiques qui sont constitutives de la qualité de service.

Cette structure classique est appliquée traditionnellement en traitant chaque élément d'offre (typiquement un tronçon de route dans une affectation routière) comme un sous-système particulier, qui échange des flux avec ses voisins mais dont l'état ne dépend que de ses propres caractéristiques et du flux qui le traverse. Or le modèle CapTA approfondit considérablement le fonctionnement de l'offre i.e. la partie (iv) : chaque ligne est traitée comme un sous-système qui reçoit de l'extérieur une matrice de flux par « leg » i.e. par couple entrée-sortie de stations, et réciproquement renvoie la matrice des temps généralisés par leg et celle des fréquences effectives en montée. A l'intérieur du sous-système Ligne, de l'amont vers l'aval chaque mission est traitée comme un sous-système pour le chargement des voyageurs et le confort à bord du véhicule, et les missions sont « co-opérées » par la répartition des usagers sur les legs où plusieurs missions se recouvrent, par l'occupation d'ensemble de la voie et par la répartition du temps à quai. De plus, par station les voyageurs en montée attendent « en troupeau » un véhicule attractif pour leur station de descente et disposant d'une capacité résiduelle, déduction faite de la charge présente à bord.

Au total, le modèle CapTA opère en duplex : l'étage supérieur traite les voyageurs et leurs mouvements sur les tronçons pédestres et sur les legs des lignes. L'étage inférieur traite les véhicules et les conditions d'exploitation par ligne, par station et par mission. Cette décomposition est pleinement conforme à l'analyse systémique initiale (figure 1).

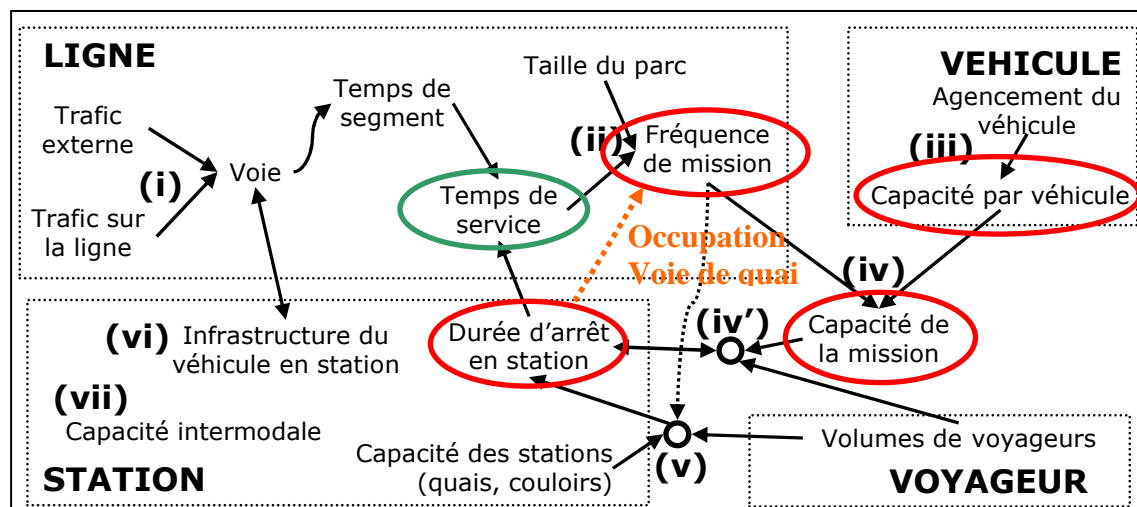


Fig. 1. Analyse systémique de la capacité en TC (d'après Leurent, 2010).

2.2 Le modèle de ligne

Une « ligne d'exploitation » est un sous-ensemble de missions de service, assurées chacune par des véhicules qui réalisent des courses. L'exploitation de chaque véhicule suit une chronologie qui reflète la structure spatiale de la mission : cette structure spatiale induit un *ordre topologique* qui est fondamental dans le traitement du trafic. L'ordre topologique vaut même pour une ligne composée de diverses branches (cas du RER francilien) et régit le traitement des stations. Par station, cinq opérations sont traitées successivement :

- i. La descente des voyageurs sortants et la libération de leurs places assises ;
- ii. Le mouvement des voyageurs à l'intérieur du véhicule et l'occupation des places assises disponibles ;
- iii. L'attente des voyageurs à quai et leur montée en véhicule selon la capacité résiduelle, et pour ceux qui parviennent à monter, l'accès aux places assises subsidiaires ;
- iv. Le temps de stationnement et d'occupation de la voie de quai, qui détermine la performance et la fréquence des missions sur la ligne.
- v. L'interaction des véhicules avec le trafic général sur les arcs d'interstation.

Chaque opération est traitée par un modèle local spécifique (figure 2).

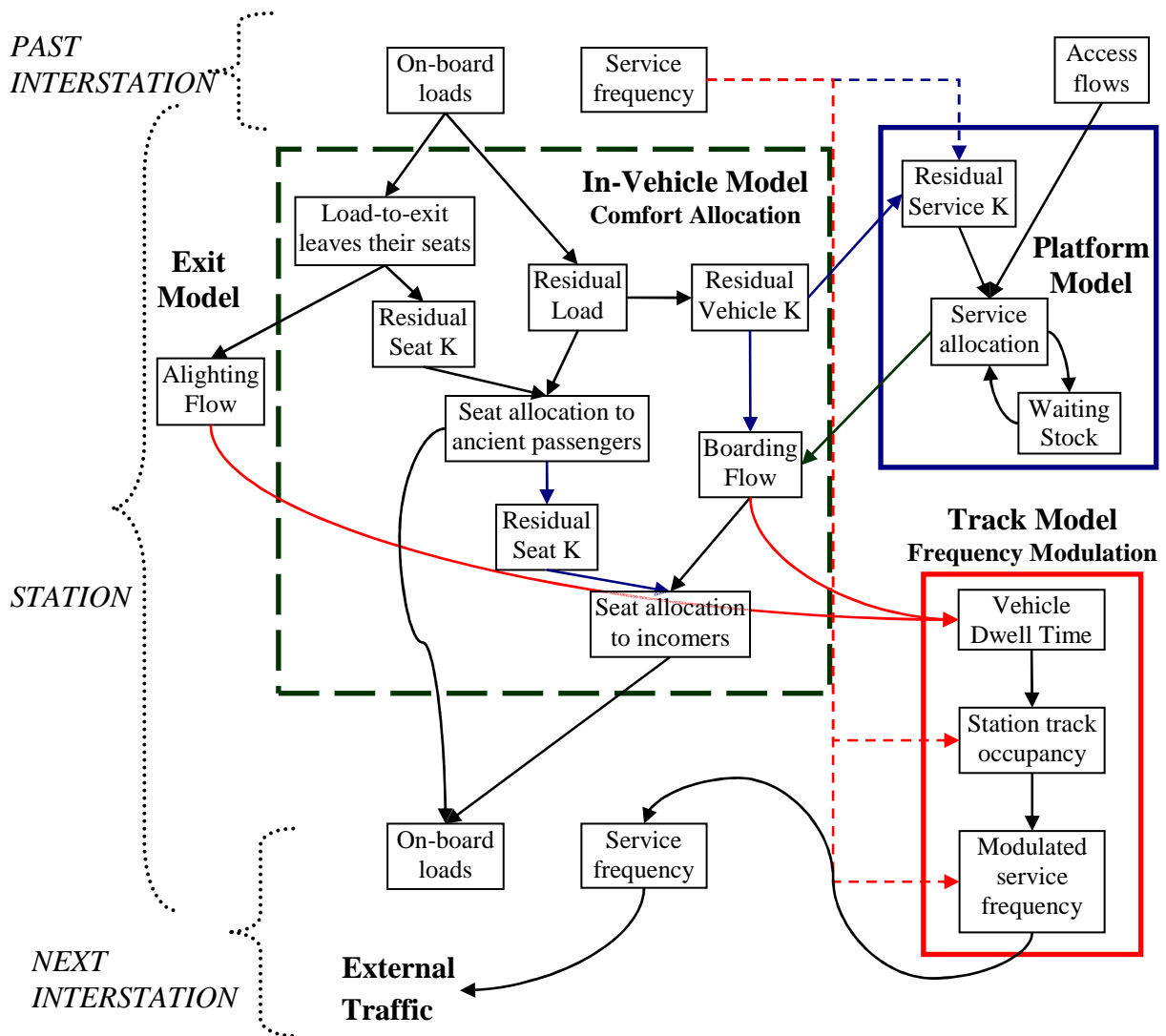


Fig. 2. Le modèle de ligne et ses sous-modèles dans CapTA (K pour capacité).

Au plan algorithmique, par rapport à un modèle d'affectation TC par tronçon et sans phénomènes de congestion, deux facteurs de complexité informatique viennent s'ajouter : d'une part le traitement matriciel des stations le long de chaque ligne (d'où un facteur multiplicatif égal au nombre de stations par ligne), d'autre part, comme dans tout modèle avec congestion, une succession d'itérations est nécessaire pour calculer un état d'équilibre du trafic (facteur égal au nombre des itérations). Le coût informatique d'une simulation complète reste très abordable.

2.3 Les contraintes de capacité

Les capacités suivantes sont distinguées : (a) la capacité en places assises d'un véhicule, (b) la contenance totale du véhicule et (b') la capacité d'échange entre véhicule et quai, (c) la capacité en véhicules d'une section de voie, pour la circulation et le stationnement. Chaque type de capacité fait l'objet d'un sous-modèle spécifique.

i. Le Confort en Véhicule

A l'intérieur d'un véhicule, le confort du voyageur dépend de sa position assise ou debout. Une place assise est plus confortable qu'une place debout, et celle-ci d'autant plus inconfortable que l'espace alloué est occupé plus densément. On associe facilement un facteur d'inconfort à l'état debout, dosé en fonction de l'encombrement. Surtout, il faut allouer les places assises aux voyageurs en respectant la chronologie des dessertes des stations ainsi que les priorités entre les voyageurs. Notre modèle (Leurent 2006, 2012) traite les stations par ordre topologique d'amont en aval ; en chaque station les voyageurs qui vont descendre libèrent leurs places assises, qui sont allouées en priorité aux voyageurs debout restés à bord (avec une équi-probabilité), puis le reste est alloué aux voyageurs en montée (encore avec une équi-probabilité). On en déduit les coûts moyens par leg en fonction des inconforts locaux et des probabilités d'accès.

ii. Le Modèle de Plateforme et d'Attente à Quai

Entre un véhicule et un quai de station, l'échange de flux de voyageurs est contraint par (i) le stock de voyageurs désireux de monter, (ii) la contenance totale du véhicule donc sa capacité résiduelle en montée après la descente des voyageurs sortants, (iii) la capacité d'échange propre au véhicule (nombre et largeur des portes, encombrement) en interaction avec le quai (écart et dénivellement entre la porte du véhicule et le bord du quai, encombrement du quai). Dans notre modèle de plateforme et d'attente à quai (Leurent et Chandakas, 2012), en une station de montée i le stock σ_{is} des voyageurs demandeurs d'un trajet jusqu'à la station s en aval de i est confronté aux capacités résiduelles des missions z qui desservent i et s , et aux stocks des autres voyageurs intéressés aussi par une telle mission. Par véhicule de la mission z , le stock de voyageurs candidats à l'embarquement, n_{zi} , est la somme des stocks de toutes les stations desservies par la mission. Par conséquent, un stock par mission n_{zi} est confronté à la capacité disponible à la montée k'_{zi} et donne une probabilité de montée immédiate, $\pi_{zi} = \min\{1, k/n\}$. Par station de descente, le temps d'attente moyen à quai est calculé par un modèle de goulot d'étranglement.

iii. Le Modèle d'Occupation de Voies à Quai (Leurent et al, 2011)

Chaque point de la voie est considéré comme une ressource rare dont l'occupation est requise par le passage des véhicules successifs. Tout véhicule qui circule sur la ligne bloque, « immobilise » le point pendant une durée qui totalise le temps d'occupation et la marge opérationnelle. En une station desservie, le temps T_{zi} de stationnement d'un véhicule dépend

des flux en descente et en montée : ainsi les mouvements des voyageurs agissent sur la trajectoire spatio-temporelle du véhicule. La durée d'immobilisation de la voie demandée par les véhicules programmés est confrontée à la durée de la période, pour déterminer le besoin et la proportion d'un rationnement. Cette proportion vient moduler les fréquences des missions qui passent par la station, localement et en aval, ce qui réduit la capacité offerte en aval. De plus l'allongement des séjours à quai influence les temps de parcours des véhicules donc des voyageurs qu'ils contiennent : la modulation des fréquences allonge les attentes moyennes en station ; et l'opérateur régularise l'exploitation en faisant remonter en amont le facteur de rationnement, par un ralentissement des véhicules ultérieurs.

3. Simulation du réseau francilien à l'HPM 2008

Pour démontrer les potentialités du modèle CapTA, nous l'avons appliqué au réseau de TC en Ile de France, en reprenant les données d'offre et de demande des services de l'Etat (la DRIEA, modèle MODUS).

3.1 Offre et demande de TC à l'Heure de Pointe du Matin

La période simulée est une Heure de Pointe du Matin (HPM) : une moyenne horaire de la tranche matinale de 7 h à 9 h pour un Jour Ouvrable de Base en 2008. L'offre de TC est décrite exhaustivement, avec toutes les missions des trains régionaux, RER, métro, tramway et autobus (figure 3). Par mission, en fonction du type de véhicule nous avons spécifié la contenance totale et la capacité assise.

La demande de déplacement est répartie par relation origine-destination sur un territoire découpé en 1305 zones. Nous avons amplifié de 30% la matrice origine-destination des flux, afin de figurer un régime d'hyperpointe qui concernerait la demi-heure la plus chargée. Enfin, pour le choix d'itinéraire du voyageur individuel, nous avons spécifié une fonction de temps généralisé avec un coefficient de pénibilité de 1 pour le temps passé assis à bord d'un véhicule, de 1,2 à 2 pour la position debout à bord selon que la densité varie de 2 à 4 personnes au mètre carré, et de 2 pour les temps d'attente à quai ou de marche (en correspondance ou en accès terminal).

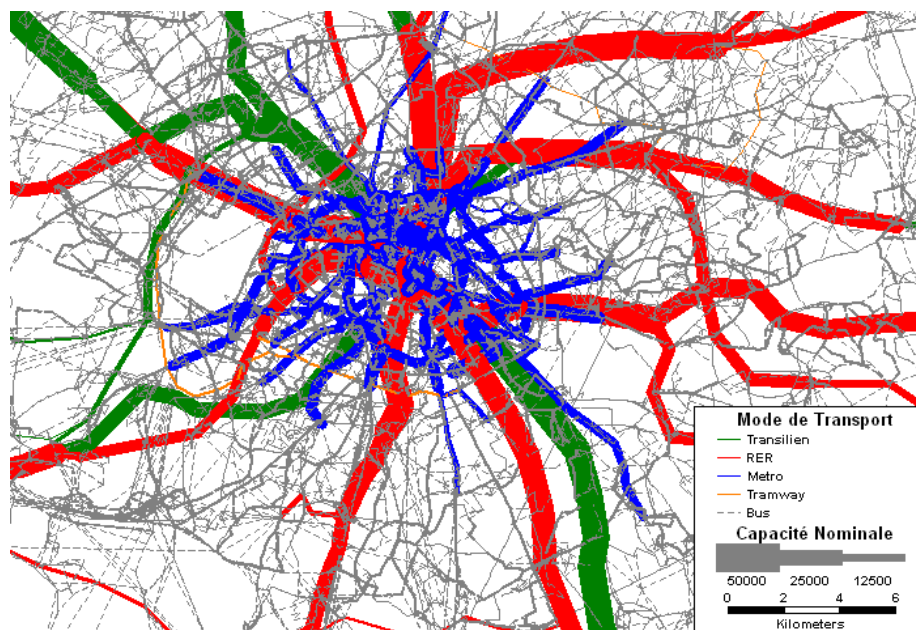


Figure 3: La capacité totale des lignes, par mode de transport (secteur central)

3.2 L'affectation du trafic de voyageurs sur le réseau

La charge locale de trafic, par tronçon ou via un nœud, est un résultat essentiel du modèle d'affectation pour la planification et le dimensionnement des moyens. Pour l'Ile de France à 130% de demande, hors congestion la ligne A du RER recevrait 100 000 voyageurs par heure en section centrale du sens est-ouest ! Or la capacité nominale n'est « que » de 58 000 v/h. Donc il faut expliciter les mécanismes et les effets de congestion : l'écart entre les flux est considérable, de 100-58 = 42 milliers de voyageurs (équivalent à 20 files d'autoroute fonctionnant à pleine capacité) qui se reportent vers d'autres itinéraires, dont ils influencent fortement la charge donc la qualité de service...

La figure 4 montre les charges de trafic obtenues en simulant la congestion. Des contraintes de capacité sont respectées quasi-partout (seuls quelques tronçons en violet atteignent au plus 104%), car le modèle de plate-forme fait déborder un flux excessif sur le flanc de la période temporelle. Les valeurs proches de l'unité pour le ratio entre flux et capacité induisent une élévation sensible du coût en véhicule pour les voyageurs. Cependant la figure ne montre pas les temps d'attente en station, plus forte aux lieux de saturation des véhicules.

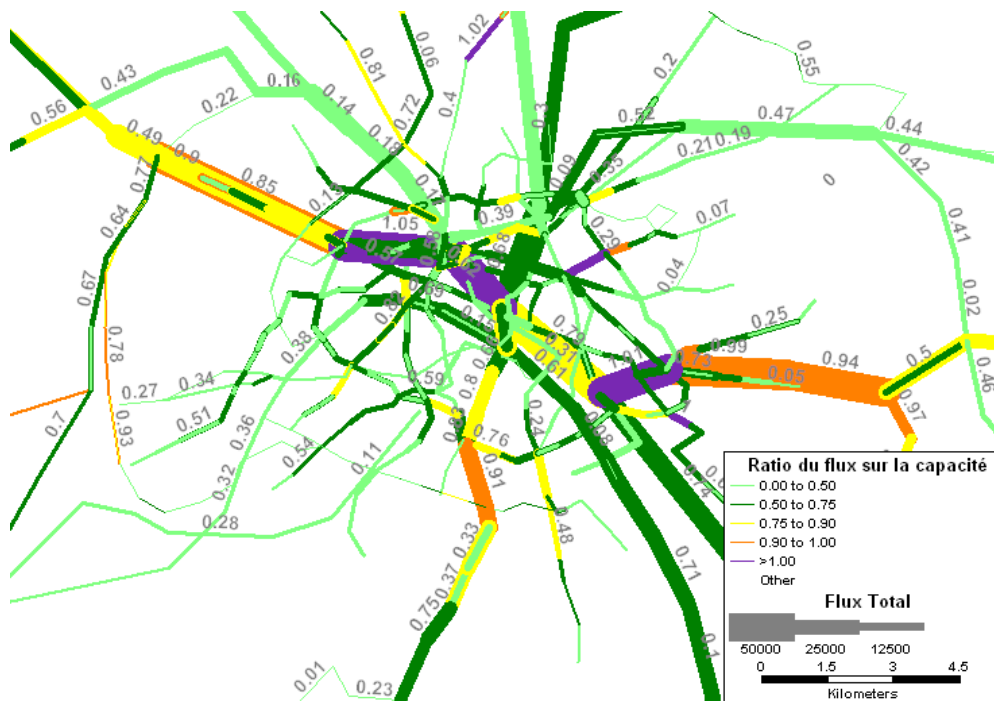


Figure 4 : Le flux de voyageurs et le ratio flux sur capacité nominale

3.3 Conséquences pour les usagers

Le temps généralisé moyen se compose de temps d'attente pour 29%, de temps en véhicule pour 41%, de marche en correspondance pour 6% et de marche de rabattement pour 24%. Il dépasse de 11% le résultat d'une simulation sans congestion, en raison surtout d'un accroissement de 23% du temps généralisé en véhicule. Entre les deux variantes de modèle, l'augmentation du temps d'attente est limitée, ce qui reflète que la capacité totale suffit globalement sur le réseau francilien – les débordements temporels locaux restent inférieurs au temps nécessaire pour se reporter vers un autre moyen de transport.

Cependant la synthèse d'ensemble ne doit pas masquer les résultats particuliers. Nous avons étudié en détail la ligne la plus chargée, le RER A en sens est-ouest. La figure 5 montre les temps de trajet, depuis chaque station de montée jusqu'à la gare de La Défense qui est une

destination matinale pour de très nombreux travailleurs. Les deux graphiques superposés à gauche correspondent aux branches nord et sud à l'est, tandis que le graphique de droite correspond aux stations du tronçon central.

Les courbes pleines concernent le temps physique : selon la couleur, il s'agit du temps de parcours pur, ou du temps d'attente en station (intégrant la fréquence et l'alternance des missions, ainsi que l'éventualité de ne pouvoir embarquer dans le premier véhicule en cas de stock permanent de voyageurs sur le quai), ou le temps de trajet complet qui est la somme du temps d'attente et du temps de trajet. Il apparaît que les phénomènes d'attente et de stockage provoquent certaines irrégularités contre-intuitives dans l'évolution des courbes, avec quelques stations en lesquelles le temps d'attente et même le temps de trajet augmentent au lieu de décroître par rapport à la station en amont.

Les courbes en trait tireté représentent le temps généralisé. La disposition d'une place assise est plus certaine en début de ligne, au bénéfice des voyageurs qui débutent leur trajet en grande banlieue, mais avec des conséquences contre-intuitives sur les variations du temps généralisé entre les relations origine-destination.

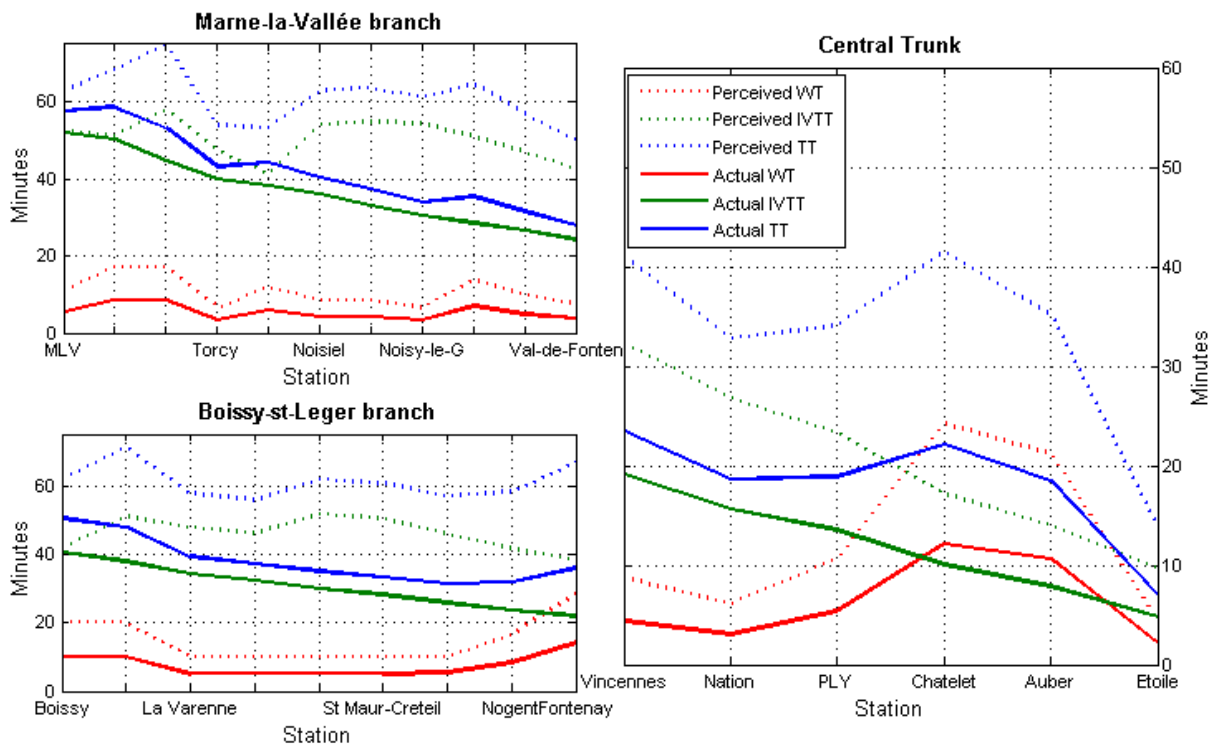


Fig. 5. Temps physique / généralisé vers La Défense par le RER A depuis l'est, HPM.

3.4 Conséquences sur l'exploitation des missions

La capacité des voies contraint la fréquence de service et réduit la fréquence nominale de plusieurs d'entre elles : cf. figure 6 pour certaines lignes structurantes en Ile de France. La réduction opère aux stations où le flux en échange dépasse sa capacité : cela peut survenir en amont des tronçons les plus demandés, réduisant ainsi la capacité de circulation là où elle est indispensable ! En particulier, la fréquence du RER A vers l'ouest est réduite de 30 véh/h à 27,2 véh/h, soit -9,3%.

En détaillant les missions qui desservent la ligne A (figure 7), on constate que le type de véhicule est important pour limiter le temps de stationnement malgré l'intensité du flux d'échange (missions UGIN, UNIP et UPAC).

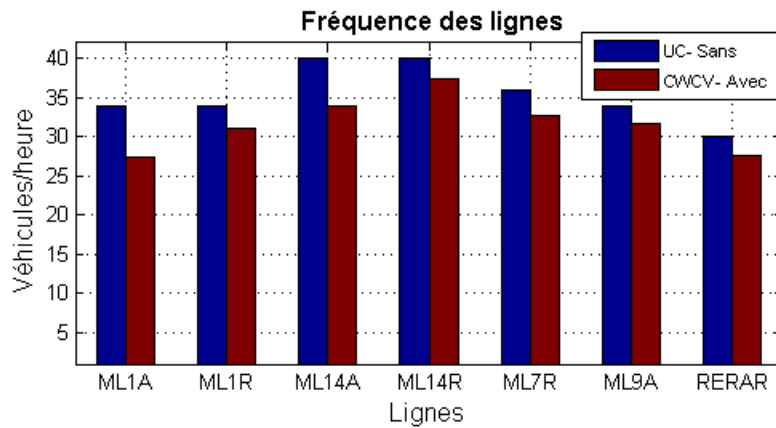


Figure 6 : Fréquence nominale ou rationnée au terminus d'une ligne.

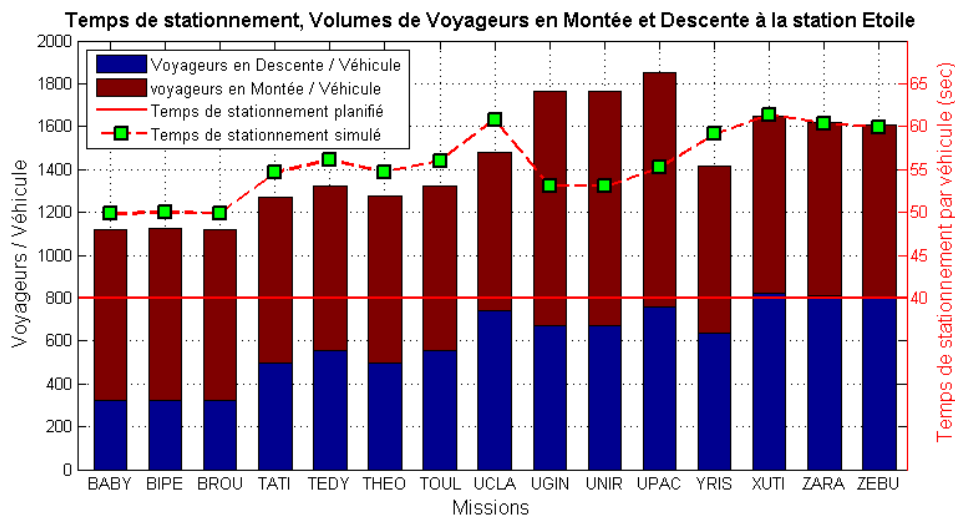


Figure 7: Voyageurs en montée/descente et temps de stationnement par véhicule du RER A, station Etoile

3.5 Conception et évaluation de projets d'investissement

La capacité fonctionnelle du modèle CapTA permet d'évaluer l'impact socioéconomique d'un projet, du moins en ce qui concerne le surplus des usagers. Nous avons simulé un projet d'investissement de capacité pour la ligne A du RER : le remplacement des véhicules de 2008 par des trains de plus forte capacité. Le remplacement des trains à un niveau (MS61 et MI84) par des trains à deux niveaux (MI09, similaires à l'existant MI2N) apporte entre 30 et 40% de capacité supplémentaire en contenance de voyageurs par train, comme en capacité d'échange à quai, par la disposition des portes le long des voitures composant les rames. Cela permet d'améliorer notablement la performance de la ligne, en limitant le rationnement de la fréquence de service, ainsi que le confort offert.

Nous avons simulé le projet d'investissement et comparé les résultats de son affectation, avec ceux de la situation de référence. Le projet réduirait le temps généralisé total de 24 150 heures sur une heure de pointe, soit un gain de près de 30 millions d'heures par an. En valorisant les gains de temps à raison de 10 €/h, le surplus des usagers parviendrait à contrebalancer le coût d'investissement (de l'ordre de 2 G€) en moins de sept années.

4. Conclusion

Le modèle CapTA permet d'intégrer une série de contraintes de capacité en cohérence avec les choix d'itinéraire des usagers, dans la simulation du trafic sur un réseau de TC. Son architecture a été inspirée par une analyse systémique initiale, qui a déterminé une décomposition en sous-systèmes et leur traitement par des sous-modèles dédiés.

Le logiciel applicatif est désormais disponible, avec une interface utilisateur réduite, pour des applications d'aide à la décision dans le contexte professionnel de l'ingénierie-conseil.

La composition modulaire du modèle facilitera son enrichissement ultérieur. Deux chantiers sont en cours au LVMT : l'un concerne la modélisation stochastique du trafic, pour simuler l'hétérogénéité des charges à l'intérieur d'un véhicule comme entre deux véhicules opérant le même service, des intervalles entre véhicules, des temps de parcours et des charges sur un même trajet d'un jour à l'autre... L'autre chantier concerne l'évaluation et la conception : des indicateurs de coût marginal de congestion sont en développement pour guider le concepteur dans l'identification des points critiques à traiter prioritairement. Enfin, des recherches connexes portent sur la circulation des voyageurs dans les stations, et sur la mobilité plurimodale entre modes privés et modes publics collectifs ou individuels.

Remerciements. Ce travail s'inscrit dans la Chaire de Recherche et de Formation « *Socio-économie et modélisation des transports collectifs de voyageurs en milieu urbain* », portée par l'Ecole des Ponts ParisTech, en partenariat avec le Syndicat de Transports d'Ile-de-France (STIF) que nous remercions très vivement pour son soutien. Nous remercions également la Direction Régionale et Interdépartementale d'Ile-de-France (DRIEA) pour la mise à disposition des bases de données utilisées dans notre simulation.

5. Références

- Certu (2003), *Modélisation des déplacements urbains de voyageurs : guide des pratiques*. Rapport du Certu, éditions du Certu, Lyon.
- Leurent F (2006). *Confort et qualité de service en transport collectif urbain de voyageurs : analyse, modélisation et évaluation*. Congrès Annuel ATEC-ITS 2006, actes sur CD Rom. ATEC, Paris. 20 p.
- Leurent F (2010). *Capacité et congestion dans les systèmes de transports de voyageurs : Analyse systémique et examen des modèles d'affectation sur un réseau*. Congrès annuel ATEC-ITS 2010, actes sur CD Rom. ATEC, Paris. 38 p.
- Leurent F. (2011), *Transport capacity constraints on the mass transit system: a systemic analysis*. European Transport Research Review, Vol. 3, pp. 11-21 . DOI: 10.1007/s12544-011-0046-5
- Leurent F. (2012), *On Seat Capacity in Traffic Assignment to a Transit Network*. Journal of Advanced Transportation. April 2012, Vol. 46, Issue 2, pp 112-138, DOI: 10.1002/atr.146
- Leurent F., Chandakas E. (2012), *The Transit Bottleneck Model*, Procedia – Social and Behavioral Sciences, Vol. 54, pp 822-833
- Leurent F., Chandakas E., Poulhès A. (2011), *User and Service Equilibrium in a structural model of traffic assignment to a transit network*, Procedia Social and Behavioral Sciences, Vol. 20, pp. 495-505
- Leurent F., Chandakas E., Poulhès A. (2012), *A passenger traffic assignment model with capacity constraints for transit networks*, Procedia – Social and Behavioral Sciences, Vol. 54, pp 772-784
- Ortuzar J.D. and Willumsen L. (2004), *Modelling Transport*, Wiley, 3rd edition
- TCQSM (2003) *Transit Capacity and Quality of Service Manual*. On-line report prepared for the Transit Cooperative Research Program: http://gulliver.trb.org/publications/tcrp/tcrp_webdoc_6-a.pdf. First edition 1999.
- Vuchic V.R. (2006), *Urban Transit : Operations, Planning and Economics*, Wiley.